

Humboldt-Universität zu Berlin

## DISSERTATION

### **Bewertung von Arbeitsprozessen im Gartenbau mit Hilfe der dreidimensionalen Bewegungsanalyse**

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum agriculturalarum (Dr. rer. agr.)

Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

Dipl. Ing. agr. Martina Jakob

Prof. Dr. Uwe Jens Nagel

Gutachter: 1. Professor W. Bokelmann  
2. Professor S. Kleisinger  
3. Dr. M. Geyer

eingereicht: 3. Juni 2004  
Datum der Promotion: 3. Februar 2005

Die vorliegende Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.

Die Grundlagen für die Arbeit wurden in den vergangenen vier Jahren am Institut für Agrartechnik Bornim e.V. mit Sitz in Potsdam erarbeitet.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Bokelmann für die freundliche Annahme des Themas sowie für seine Betreuung seitens der Universität. Des weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Geyer für die Unterstützung am Institut für Agrartechnik bedanken.

Ein weiteres Dankeschön gilt Herrn Dr. Geyer und Herrn Professor Kleisinger für ihre Gutachter-Bereitschaft.

Erwähnt werden soll auch die von Dr. Ivanov durchgeführte Programmierung der Auswertesoftware, die in vielen anregenden Diskussionen entstanden ist und sukzessiv im praktischen Einsatz erweitert wurde.

Für die Versuchsergebnisse maßgeblich verantwortlich waren die hochmotivierten studentischen Hilfskräfte Karin und Nicole, bei denen ich mich ebenfalls herzlich bedanken möchte.

Besonders erwähnen möchte ich auch meinen ehemaligen Kollegen Dr. Oberbarnscheidt, der sich im wohlverdienten Ruhestand für konstruktive Kritik verdient gemacht hat.

## Inhaltsverzeichnis

<b><i>Inhaltsverzeichnis .....</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>Abbildungsverzeichnis .....</i></b>	<b><i>4</i></b>
<b>1      <i>Einleitung.....</i></b>	<b>7</b>
1.1 <b>Problemstellung.....</b>	<b>7</b>
1.2 <b>Zielsetzung .....</b>	<b>8</b>
<b>2      <i>Grundsätze der Gestaltung und Bewertung von Arbeitssystemen. 10</i></b>	
2.1 <b>Besonderheiten der gartenbaulichen Arbeitsgestaltung .....</b>	<b>14</b>
2.2 <b>Grundlagen der arbeitswissenschaftlichen Beurteilung.....</b>	<b>17</b>
<b>3      <i>Bewegungsanalyse.....</i></b>	<b>23</b>
3.1 <b>Rückblick auf die Entwicklung der Bewegungsanalyse.....</b>	<b>23</b>
3.2 <b>Einsatz der Bewegungsanalyse in der Medizin und im Sport.....</b>	<b>26</b>
3.3 <b>Einsatz der Bewegungsanalyse in der Arbeitswissenschaft .....</b>	<b>29</b>
<b>4      <i>Methodenentwicklung .....</i></b>	<b>31</b>
4.1 <b>Beschreibung der Messtechnik .....</b>	<b>31</b>
4.2 <b>Vorgehensweise.....</b>	<b>33</b>
4.3 <b>Genauigkeit und Beurteilung der Güte einer Messung .....</b>	<b>34</b>
4.4 <b>Analysesoftware .....</b>	<b>39</b>
4.4.1 <b>Quantitative Messgrößen .....</b>	<b>40</b>
4.4.1.1 <b>Zeit.....</b>	<b>40</b>
4.4.1.2 <b>Bewegungssumme .....</b>	<b>41</b>
4.4.1.3 <b>Bestimmung des Arbeitsbereiches im Raum .....</b>	<b>41</b>
4.4.1.4 <b>Ermittlung der Länge einzelner Bewegungsabschnitte .....</b>	<b>42</b>
4.4.1.5 <b>Abstand zwischen zwei Punkten verschiedener Kanäle .....</b>	<b>44</b>
4.4.1.6 <b>Entfernung zur Arbeitsoberfläche .....</b>	<b>46</b>
4.4.1.7 <b>Anzahl der Bewegungen.....</b>	<b>46</b>
4.4.1.8 <b>Winkelfunktionen .....</b>	<b>47</b>
4.4.2 <b>Qualitative Bewertungskriterien .....</b>	<b>51</b>

---

4.4.2.1	Räumliche Darstellung der Bewegungslinien.....	51
4.4.2.2	Messkanalweise Darstellung der Bewegungslinien .....	51
4.4.2.3	Visualisierung von Geschwindigkeiten einzelner Bewegungsabschnitte innerhalb des Arbeitsvorganges .....	52
<b>5</b>	<b><i>Ergebnisse.....</i></b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>Versuch 1 (Steharbeitsplatz Produkthandling) .....</b>	<b>53</b>
5.1.1	Material und Methode .....	54
5.1.2	Ergebnisse .....	56
5.1.3	Diskussion .....	65
<b>5.2</b>	<b>Versuch 2 (Sitzplatz auf Spargelerntehilfen) .....</b>	<b>71</b>
5.2.1	Material und Methode .....	72
5.2.2	Ergebnisse .....	75
5.2.3	Diskussion .....	86
<b>6</b>	<b><i>Abschließende Bewertung der Methode.....</i></b>	<b>90</b>
<b>6.1</b>	<b>Vergleich mit bisher angewandten Methoden .....</b>	<b>90</b>
<b>6.2</b>	<b>Informationsgewinn .....</b>	<b>95</b>
<b>6.3</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>101</b>
<b>6.4</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>104</b>
<b>7</b>	<b><i>Zusammenfassung .....</i></b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b><i>Summary.....</i></b>	<b>108</b>
<b>9</b>	<b><i>Quellenverzeichnis .....</i></b>	<b>110</b>
9.1	Literaturquellen .....	110
9.2	Internetquellen .....	116
<b>10</b>	<b><i>Anhang.....</i></b>	<b>117</b>
<b>10.1</b>	<b>Algorithmen zur Berechnung ausgewählter Indikatoren.....</b>	<b>117</b>
10.1.1	Interpolation von Bereichen mit nicht sichtbaren Punkten .....	117
10.1.2	Bewegungssumme .....	118
10.1.3	Winkelberechnung für drei ausgewählte Kanäle .....	118
10.1.4	Bestimmung des Arbeitsbereiches.....	121

---

10.1.5	Bezugsobjekt .....	122
<b>10.2</b>	<b>Menustruktur der Analysesoftware .....</b>	<b>123</b>
<b>10.3</b>	<b>Vorgehensweise für die Durchführung der Bewegungsanalyse an ortsfesten Arbeitsplätzen .....</b>	<b>126</b>
<b>10.4</b>	<b>REFA-Standardprogramm Systeme vorbestimmter Zeiten.....</b>	<b>127</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ablauf eines Standpagats .....	28
Abb. 2: Aluminium-Profil mit Messkameras (CCD-Kameras links und rechts, Videokamera Mitte) .....	31
Abb. 3: Beispiel einer „zittrigen“ Bewegungslinie aufgrund hoher Aufzeichnungsfrequenz (50 Hz) und langsamen Bewegungen mit erklärender Ausschnittvergrößerung .....	35
Abb. 4: Darstellung der Antennen zur Bewegungsverstärkung .....	37
Abb. 5: Darstellung des Arbeitsbereiches der rechten Hand beim Auflegen von Porree auf ein Förderband (je dunkler, desto häufiger frequentierter Bereich) .....	42
Abb. 6: Darstellung von Einzelbewegungen (oben) und ihre als Scheitelpunkte definierten maximalen Abstände zur Arbeitsoberfläche in cm (unten) .....	44
Abb. 7: Sechs Leuchtdioden, durch deren Verbindung die Unterarme, Oberarme und der Schultergürtel schematisch dargestellt werden .....	45
Abb. 8: Berechnung des Gelenköffnungswinkels ( $\alpha$ ) basierend auf den Messpunkten an Schultern (B), Ellen (A) und Händen (C); Grauschattierung spiegelt die Häufigkeit wider (je dunkler, desto häufiger) .....	48
Abb. 9 Berechnung des Armhebewinkels ( $\beta$ ) basierend auf den Markern an Schulter (B) und Elle (A).....	50
Abb. 10: Räumliche Darstellung der Bewegungslinien der rechten Hand von vorn in geschwindigkeitsabhängiger Färbung .....	52
Abb. 11: Steharbeitsplatz bei der Aufbereitung von Porree.....	54
Abb. 12: Streubreite der über die Versuche gemessenen Leistungen aufgelegter Stangen/h in Abhängigkeit von der Maschinenkapazität .....	57
Abb. 13: Personenspezifische Leistungsunterschiede aufgelegter Stangen im Durchschnitt aller Varianten .....	58
Abb. 14: Bewegungssummen der oberen Extremitäten eines Probanden in m für einen Durchgang (li. Schulter 1, li. Elle 2, li. Hand 3, re. Hand 4, re. Elle 5, re. Schulter 6) bei niedriger Bandhöhe (schwarz) und optimaler Bandhöhe (hellgrau).....	59

---

Abb. 15: Kopfbewegung und durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Produktbereitstellung, Variante 1: Kiste auf Bandhöhe, Variante 2: Kiste nahezu ebenerdig .....	59
Abb. 16: Aufgelegte Stangen pro Stunde bei zwei Probanden und unterschiedlicher Anordnung der Kisten .....	61
Abb. 17: Bewegungsaufwand von Person C für den Kopf und beide Hände bei unterschiedlicher Bandlaufgeschwindigkeit und Produktbereitstellung .....	61
Abb. 18: Öffnung des rechten Armes während der Arbeit in Abhängigkeit von der Bandlaufgeschwindigkeit.....	63
Abb. 19: Anheben des Oberarmes während der Arbeit in Abhängigkeit von der Bandlaufgeschwindigkeit.....	63
Abb. 20: Winkelverlaufsdiagramm des rechten Armes für das Greifen (G) und Ablegen (A) eines gegriffenen Bundes Weidenabschnitte .....	64
Abb. 21: Sitzkonstruktionen: Kniesitz Praxis (links), Labor (Mitte) und Oberkörperstütze Labor (rechts) .....	72
Abb. 22: Sitzplätze im Arbeitsprozess, Kniesitz in der Praxis (links), im Labor (Mitte) und Oberkörperstütze Praxis (rechts) .....	72
Abb. 23: Anordnung der Felder in der Mörtelwanne, X ist der Standort des Probanden (untere Abbildung); Kniesitz im Labor mit Felderbezeichnung in der Mörtelwanne und gekennzeichneten Dioden (obere Abbildung).....	74
Abb. 24: Vergleich der aufgezeichneten Bewegungssummen der rechten Hand von zwei Probanden für beide Sitzplatzvarianten.....	76
Abb. 25: Bewegungssummen in m für das Stechen von 50 Stangen für den Sitz mit Oberkörperstütze, Unterschiede der verschiedenen Interpolationsalgorithmen „speed based“ und „straight approximation“.....	77
Abb. 26: Darstellung des Verlaufs der Oberkörperwinkel für die Oberkörperstütze (links) und den Kniesitz (rechts) .....	78
Abb. 27: Ausschnitt der gemessenen Rumpf- und Armöffnungswinkel im Zeitverlauf beim Stechen auf dem Kniesitz .....	79
Abb. 28: Verlauf von Armöffnungswinkel und Rumpfwinkel für das Stechen einer Stange auf dem Kniesitz (linke Körperhälfte) .....	80
Abb. 29: Prozentuale Anteile der Armöffnungswinkel (rechts) auf dem Kniesitz bei Verwendung von unterschiedlichen Algorithmen zur Winkelberechnung .....	81

---

Abb. 30: Prozentualer Anteil der Armwinkelöffnungswinkel (links) bei zwei Personen im Arbeitsverlauf auf dem Sitz mit Oberkörperstütze .....	82
Abb. 31: Darstellung der typischen Doppel-S-Krümmung der Wirbelsäule (aus: <a href="http://www.biomedicus.de/krankheit/wirbels1.htm">http://www.biomedicus.de/krankheit/wirbels1.htm</a> ) .....	83
Abb. 32: Verlauf der Abweichungen des Schulter-Hüft-Abstandes vom Referenzwert bei Person K auf dem Sitz mit der Oberkörperstütze .....	84
Abb. 33: Summe aller Schulter-Hüftabstände (in mm) < Null auf den verschiedenen Sitzen bei zwei Probanden.....	85
Abb. 34: Schematischer Ablauf der Methodenentwicklung .....	90
Abb. 35: Geschwindigkeitsabhängige Interpolation fehlender Messwerte.....	117
Abb. 36: Schematische Darstellung der Winkelberechnung um drei Kanäle.....	120
Abb. 37: Beispiel der räumlichen Zuordnung einer Strecke p,q.....	121
Abb. 38 : Bezugsobjekt ausgehend von Punkt (0,0,0).....	122



## 1 Einleitung

Arbeitsplätze im Gartenbau sind trotz fortschreitender Mechanisierung durch einen hohen Anteil an Handarbeit gekennzeichnet. Die Inhomogenität und Empfindlichkeit gartenbaulicher Produkte erschweren die Mechanisierung von Ernte- und Aufbereitungsverfahren bzw. machen sie sehr kostenintensiv. Besonders in kleinen, aber auch in mittleren und großen Betrieben erfolgen im Rahmen moderner Produktionsverfahren noch große Teile der Arbeiten von Hand oder in teilmechanisierten Prozessen.

Viele gartenbauliche Arbeiten werden zudem in ungünstigen Körperhaltungen durchgeführt, wie z.B. gebückt bei der Handernte von Erdbeeren, Spargel oder Salat. Das Bewegen größerer Gewichte von Hand, sowohl auf dem Feld, als auch im Ablauf der Nachernte, gilt als problematisch. Das Temperaturregime im Produktions- und Nacherntebereich ist an die Produkte (Wildt 1988) und nicht an die Bedürfnisse der Arbeitskräfte angepasst (z.B. Kühlung), bzw. ist es im Rahmen der natürlichen Schwankungen nicht zu beeinflussen (z.B. Außentemperatur). Die Summe der auf die Arbeitskraft wirkenden Belastungen ist hoch (Timme 1990; Vos 1973).

Die Saisonalität der Produkte erfordert eine große Variabilität im Personalstamm der Betriebe, vorhandene Spezialmaschinen können nur kurze Zeit im Jahr eingesetzt werden. Die Wertschöpfung aus den Produkten ist gering, das Lohnniveau niedrig und somit wird es immer schwerer, motivierte deutsche Saisonkräfte zu finden, die bereit sind, unter den genannten Voraussetzungen zu arbeiten. Saisonkräfte stammen derzeit zum größten Teil aus dem osteuropäischen Ausland.

### 1.1 Problemstellung

Die aktuellen Rahmenbedingungen im Produktionsgartenbau erfordern für die Zukunft einen effizienteren Einsatz des Faktors Arbeit in wirtschaftlichen und an Attraktivität gewinnenden Arbeitssystemen. Die Entwicklung solcher Systeme erfor-

dert vielfach eine objektive Bewertung vorhandener und neuer Betriebs- und Arbeitsabläufe.

Eine im Gartenbau gängige Methode zur Analyse und Gestaltung verschiedener Arbeitssysteme und –methoden ist die Durchführung von Zeitstudien. Je schneller ein Arbeitsvorgang erledigt wird, desto geringer sind die Lohnkosten. Die Zeitdauer ist als Vergleichswert jedoch nur ein grobes Maß und berücksichtigt nicht die von der Aufgabe ausgehende Belastung.

Insgesamt ergibt sich bei der Bewertung von Arbeitssystemen die Forderung nach einer objektiven und umfassenderen Methode, die sowohl wirtschaftliche als auch die menschliche Ansprüche in einem Arbeitsgang berücksichtigt. Bisher liegt kein derartiges System vor.

Die Vielzahl von Einflussfaktoren innerhalb gartenbaulicher Arbeitssysteme erschwert die objektive Bewertung dieser. Ergebnisse sind immer an die jeweiligen Rahmenbedingungen geknüpft, deren Standardisierung aufgrund der großen Schwankungsbreite von Produkt-, Betriebs- und Produktionsparametern schwierig ist. Die Gewinnung einer Vielzahl von Daten aus einer Messung reduziert die Einflüsse schwankender Parameter.

## **1.2 Zielsetzung**

Unter Berücksichtigung der aktuellen Problemfelder im Produktionsgartenbau, soll eine Methode entstehen, um typische gartenbauliche Arbeitsverfahren zu gestalten und objektiv zu bewerten. Die Arbeitssystem-Gestaltung durch Optimierung von Bewegungsabläufen sowie die Analyse von Arbeitshaltungen zur Beurteilung der Arbeitsbelastung stehen dabei im Vordergrund.

Das Ziel der Arbeit ist die Darstellung und Bewertung von Auswertalgorithmen für ein dreidimensionales Bewegungsanalyseverfahren nach arbeitswissenschaftlichen Gesichtspunkten. Die Erhebung der Daten soll dazu beitragen, die wissenschaftlichen Grundlagen für die Analyse und Gestaltung komplexer Arbeitssysteme bereitzustellen.

---

Im Rahmen der methodischen Ziele werden Indikatoren (objektive Bewertungskriterien) definiert und innerhalb praktischer Anwendungen auf ihre Eignung untersucht. Unterschiedliche gestalterische Fragestellungen werden mit Hilfe der aus der Bewegungsanalyse gewonnenen kinematischen Größen bewertet. Dasselbe gilt für die Beantwortung ergonomischer Fragestellungen. Neben der Bewertung von Körperhaltungen sollen in Verbindung mit anderen Indikatoren ihre Einflüsse auf die Gesamtleistungsfähigkeit eines Systems quantifiziert und anschließend praxisorientierte Empfehlungen zur Weiterentwicklung von Arbeitssystemen abgeleitet werden. Die Messergebnisse sollen reproduzierbar und statistisch abgesichert sein.

Ein besonderer Nutzen des Systems wird aus der Tatsache erwartet, dass die Untersuchungen im Arbeitsprozess erfolgen. Es werden dadurch Körperhaltungen untersucht, die sich aus den besonderen Rahmenbedingungen des Gartenbaus ergeben und für die es bisher nur wenige oder gar keine gestaltungsspezifischen Maßstäbe gibt. Aufgrund der Betrachtung aktiver Arbeitsabläufe werden die vom Arbeitsobjekt ausgehenden Rückwirkungen auf den Menschen berücksichtigt und mittels funktioneller Größen quantifiziert. Über die reine Gestaltung von Arbeitssystemen hinaus wird das Belastungs-Beanspruchungsmodell in die Bewertung integriert.

Dem Anspruch einer möglichst geringen Einflussnahme der Methode selbst auf den Arbeitsprozess und der Durchführung der Untersuchungen unter normalen Arbeitsbedingungen ist Rechnung zu tragen.

## 2 Grundsätze der Gestaltung und Bewertung von Arbeitssystemen

Die Gestaltung von Arbeitssystemen erfolgt unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Zwänge. In den 70er Jahren wurde die Forschung zur Humanisierung der Arbeit ins Leben gerufen, die ihre Arbeit auf viele Problembereiche, den Erwerbsalltag großer Teile der Beschäftigten betreffend, ausdehnte.

Heute stehen vor allem die folgenden Probleme im Vordergrund:

- Die Vermeidung von Gesundheitsschäden durch Unfälle (Arbeitssicherheit),
- die Vermeidung berufsbedingter Krankheiten,
- die Verbesserung von Arbeitsbedingungen,
- das Vermeiden schwerer körperlicher sowie insbesondere kurzzyklischer, repetitiver Tätigkeiten,
- die Überprüfung sozialer Rahmenbedingungen wie beispielsweise Arbeitszeitregelungen und
- die Vermeidung sozialer Isolation.

Die Arbeitsstrukturierung steht im ständigen Konflikt zwischen den Wertvorstellungen der Arbeitnehmer und den Wirtschaftlichkeitserwartungen der Arbeitgeber. Es scheint auf betriebswirtschaftlicher Seite ein Wissensdefizit über den Nutzen der Arbeitswissenschaft für die Betriebswirtschaft zu bestehen, da der Bereich Arbeitswissenschaft in der betriebswirtschaftlichen Literatur nur am Rande erwähnt wird (Hettinger & Wobbe 1993).

Die Effizienz eines Arbeitssystems ist von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig. Prozesse laufen nebeneinander und nacheinander ab und müssen hinsichtlich ihrer optimalen Ausführung untersucht werden (Stoffert 1967).

Des weiteren müssen im Gestaltungsprozess die hauptsächlichen Wechselwirkungen zwischen einer oder mehreren Personen und den Bestandteilen des Arbeitssystems, wie den Arbeitsaufgaben, den Arbeitsmitteln, dem Arbeitsraum und der Arbeitsumgebung, berücksichtigt werden (prEN ISO 6385:2002). Die Systemgrenzen müssen klar definiert werden.

Im Rahmen der ergonomischen Gestaltung von Arbeitssystemen sollte der Mensch als Hauptfaktor und integraler Bestandteil des zu gestaltenden Systems, einschließlich des Arbeitsablaufes und der Arbeitsumgebung, gelten.

Die Ergonomie ist ein wichtiger Bestandteil der Planung, denn ergonomisch gestaltete Arbeitssysteme erhöhen die Sicherheit, Wirksamkeit und Effizienz, verbessern die Arbeits- und Lebensbedingungen des Menschen und wirken nachteiligen Auswirkungen auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit des Menschen entgegen. Durch gute ergonomische Gestaltung werden das Arbeitssystem und die Zuverlässigkeit des Menschen innerhalb dieses Systems günstig beeinflusst (DIN EN 1005-1).

Die wissenschaftliche Betrachtung der „nützlichen Arbeit“ sucht nach Erkenntnissen zur Beschreibung des Menschen und seines Verhaltens unter den jeweils gegebenen Bedingungen seines Tätigseins und entwickelt daraus Regeln für die Gestaltung. Zur Gewinnung dieser Erkenntnisse werden Methoden angewandt, die sich an physiologischen und psychologischen Modellen des Menschen orientieren. Mit Hilfe dieser Modelle versucht man, sowohl die Reaktionen organischer Funktionen (z.B. des Kreislaufs) als auch das Verhalten von Personen (z.B. deren Motivation) in Abhängigkeit von den Arbeitsbedingungen zu beschreiben. Laurig (1992) definiert die planmäßige Beeinflussung oder Veränderung der Arbeitsbedingungen als die Arbeitsgestaltung.

Aus der Gesamtheit der Bestandteile eines Arbeitssystems entstehen Anforderungen an den Arbeitenden, die als Arbeitsbelastung bezeichnet werden. Diese wiederum führt zu Reaktionen beim Arbeitenden, die von seinen individuellen Merkmalen (z.B. Fähigkeiten, Begabungen, Fertigkeiten usw.) abhängig sind und die Arbeitsbeanspruchung ergeben. Die Arbeitsbeanspruchung hat beeinträchtigende (z.B. Arbeitsermüdung), neutrale oder unterstützende (z.B. Entwicklung von Fertigkeiten) Auswirkungen, die wiederum in einer Rückkopplungsschleife die individuellen Merkmale des Arbeitenden beeinflussen (prEN ISO 6385:2002).

Bei der Arbeitsplatzgestaltung sind prospektiv die Körpermaße (Anthropometrie) und das Bewegungsverhalten der späteren Benutzer zu berücksichtigen (Alexander 2002). In Form von Körperumrisschablonen kann dies in der zweidimensiona-

len Betrachtung erfolgen, siehe DIN 33408, deren Inhalt auf der vorhandenen Kie-ler Messpuppe basiert.

Eine besonders intensive Auseinandersetzung bei der Anpassung von Umgebungen an ihre Nutzer erfolgt bei der Gestaltung von Fahrzeuginnenräumen, um sowohl den Komfort als auch die Sicherheit zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Zielerfüllung bedient man sich mittlerweile computergestützter dreidimensionaler Menschmodelle, durch die der spätere Nutzer in seinen Körpermaßen nachgebildet wird. Hier sind weltweit eine Vielzahl von Computer-Menschmodellen bekannt, von denen einige im Handbuch der Ergonomie Band 1 (Schmidtke et.al. 2002) beschrieben werden. Zu den bekanntesten Menschmodellen zählen RAMSIS, Anthropos oder Mannequin. Diese Modelle ermöglichen eine realistische Simulation von Körperhaltungen und Bewegungen. Das Menschmodell RAMSIS beispielsweise besitzt einen Haltungssimulator, basierend auf hochdimensionalen Verteilungsfunktionen, die sich auf rund 60.000 3D-Datenwerte stützen (Schmidtke et al. 2002). Es besteht unter anderem die Möglichkeit zur wahrscheinlichkeitsbasierten Berechnung von Haltungen bezüglich definierbarer Aufgaben oder die Berechnung von Greifräumen (=Wirkraum der Hände) abhängig von der Haltung und Körperabmessung.

RAMSIS wurde unter der Vorgabe entwickelt, Fahrzeuginnenräume zu optimieren. Bei Körperhaltungen, die davon stark abweichen ist zu berücksichtigen, dass bei einer Komfortoptimierung durch RAMSIS keine Gewichtskräfte berücksichtigt werden (Messerschmidt 1993).

Am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München finden derzeit Bemühungen statt, definierte Körperhaltung in einem komplexen Modell komfortanalytisch zu bewerten. Eine Verknüpfung von Bewegungssimulation durch ein computergestütztes Menschmodell und Empfindungsexpression in unterschiedlichen Situationen könnte vielseitigen Einsatz finden.

In einer Reihe von Gesetzen wird gefordert, die gesicherten arbeitswissenschaftlichen Erkenntnisse bei der Arbeitsgestaltung zu berücksichtigen. Sie sind in den Vorschriften, Sicherheitsregeln und Merkblättern der Berufsgenossenschaften, Normen des DIN und den Richtlinien des VDI enthalten. Aus der Anwendung dieser Regeln resultiert eine menschengerechte Arbeitsgestaltung (Kirchner & Baum

1990). Körperhaltungen werden nur in Gesetzen zum Schutz besonderer Personengruppen genannt (Stoffert 1990).

Als allgemein anerkanntes Bewertungsschema für die Arbeitssituation, gilt das von Rohmert entwickelte vierstufige, hierarchische Modell (Luczak 1993):

- Ausführbarkeit
- Erträglichkeit
- Zumutbarkeit
- Zufriedenheit

Die Erfüllung der einzelnen Ebenen verringert die Beanspruchung, welche jeweils individualspezifisch erfahren wird. Als Grundebene besteht die Ausführbarkeit, d.h. die sich aus der Arbeitsaufgabe ergebenden Anforderungen müssen im Rahmen der menschlichen Leistungsfähigkeit liegen. Nach Erfüllung der Ausführbarkeit ist die Erträglichkeit zugewährleisten. Hierbei ist zu überprüfen, ob die Arbeit über die Dauer eines Berufslebens bei gegebener täglicher Arbeitszeit ohne Beeinträchtigung der Gesundheit ausgeführt werden kann. In der nächsten Stufe wird die Zumutbarkeit überprüft, die stark von den aktuellen sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen abhängt, zu denen beispielsweise die Arbeitslosenquote zu zählen ist. Das Kriterium Zumutbarkeit spiegelt soziale Normen einer Gesellschaft wider, die einem Wandel unterliegen. Auf der letzten Stufe im Bewertungsschema steht die Zufriedenheit, die sich aufgrund der individuellen Bewertung der eigenen Arbeitssituation nicht in objektiven Merkmalen ausdrücken lässt. Werden alle Ebenen des Bewertungsschemas erfüllt, kann davon ausgegangen werden, dass die ausgeübte Tätigkeit keinen negativen Einfluss auf die Arbeitskraft hat. Sich verändernde Rahmenbedingungen machen jedoch eine regelmäßige Wiederholung der Überprüfung notwendig.

Arbeitsgestalterische Maßnahmen mit dem Ziel der Belastungsreduzierung sollten unter den gegebenen Voraussetzungen bei zahlreichen Tätigkeiten im Gartenbau besonders beachtet werden. Der leistungsbeeinflussende Faktor beanspruchungsmindernder Maßnahmen wird häufig außer Acht gelassen. Dazu zählen eine sinnvolle Arbeitsorganisation, ein sinnvolles Pausenregime und der Einsatz

von technischen Hilfsmitteln. Bei den meisten Belastungsarten ist das Arbeitstempo, z.B. die Bewegungsgeschwindigkeit, eine signifikante Belastungseinflussgröße (Bokranz & Landau 1991), d.h. je höher das Arbeitstempo desto höher die Beanspruchung.

## **2.1 Besonderheiten der gartenbaulichen Arbeitsgestaltung**

Der Gartenbau ist vielfach gekennzeichnet durch körperlich schwere oder stark repetitive Arbeiten mit der Folge von rascher Ermüdung oder mangelnder Motivation. Im Gartenbau leiden 48% der Arbeitskräfte unter Rückenschmerzen. Rückenschmerzen sind neben Kopfschmerzen und Muskelschmerzen die häufigsten Schmerzprobleme (Mohr 1998). Im Jahr 2001 entstand in der Land- und Forstwirtschaft durch Rücken- und Muskelschmerzen ein Produktionsausfall von 1,62 Mio. Tagen Arbeitsunfähigkeit, dies entsprach einem Geldwert von 90 Mio. Euro (Statistische Informationen der BauA 2001). Jede dritte Berufsunfähigkeitsrente resultiert aus Erkrankungen der Wirbelsäule (Jürgens 1998, Lawaczek 2003). Das durch im Gartenbau ausgeführte Arbeiten resultierende Erkrankungsrisiko wird aus den genannten Zahlen deutlich, was die weltweiten Bemühungen zur Verbesserung der Situation der Arbeitskräfte in der Landwirtschaft bestätigen (Baron 2001).

Die Besonderheiten gartenbaulicher Produktion müssen bei der Gestaltung von Arbeitssystemen berücksichtigt werden (Stockey 1971). Ungünstige Körperhaltungen, repetitive und monotone Tätigkeiten sowie eine schlechte Bezahlung sind kennzeichnend für die Arbeitsbedingungen von einfachen Ernte- und Aufbereitungstätigkeiten im Gartenbau. Die Forderung, den Menschen als Hauptfaktor und integralen Bestandteil bei der Gestaltung zu berücksichtigen, wurde in vielen Bereichen der Produktion noch nicht umgesetzt. Um unter diesen Umständen eine optimale Leistungsbereitstellung der Arbeitskraft zu erreichen, bedarf es besonderer Antriebe. Die Wirkung physiologischer Belastung auf die menschliche Antriebslage, die durch ungünstige Körperhaltungen verursacht wird, untersuchte z.B. Sämann (1970). In der Regel wird die persönliche Antriebslage über eine entsprechende Entlohnung gesteuert. Da die Löhne in den beschriebenen Bereichen un-



terdurchschnittlich sind, werden die Arbeiten zu einem großen Teil von ausländischen Saisonkräften erledigt.

Bei der Bewertung der Arbeitsschwere sind auch die schwankenden klimatischen Einflüsse und ihre Wirkung auf die Beanspruchung bei Arbeiten im Freien zu berücksichtigen. Die von körperlicher Arbeit ausgehende Belastung ist stark von der Umgebungstemperatur abhängig (Spitzer 1982). Neben der Wärmeentwicklung stellt die Sonneneinstrahlung bei fehlenden Schutzmaßnahmen ein Hautkrebsrisiko dar. Auf der anderen Seite wirken zu niedrige Temperaturen negativ auf die Aufgabenausführung, insbesondere bei feinmotorischen Tätigkeiten.

Betrachtet man die Handarbeiten im Ernte- und Nacherntebereich unter Anwendung der DIN EN 1005-4 *Entwurf*, so bergen viele davon haltungs- und bewegungsbedingte gesundheitliche Risiken. Calisto (1999) hat in ihrer Arbeit ausführlich beschrieben, dass muskuloskelettale Beschwerden vor allem durch eine schlechte Arbeitshaltung verursacht oder gefördert werden können. Schmerz und Ermüdung erhöhen das Fehlerrisiko, können die Qualität des Arbeitsergebnisses mindern und zu gefährlichen Situationen führen. Statische Haltearbeit der Muskulatur führt zu vorschneller Ermüdung auf Grund der durch die Zwangshaltung bedingten Mangel durchblutung. Dadurch steigt die Herz-Kreislauf-Belastung an. Ungünstige hydrostatische Verhältnisse in den Blutgefäßen, beispielsweise bei Arbeiten im Stehen, steigern ebenfalls die Herz-Kreislauf-Belastung. Blutstaus können wiederum die Entstehung von Ödemen und Krampfadern begünstigen. Langan dauernde unphysiologische Körperhaltungen können zu Wirbelsäulenverkrümmungen führen.

Typisch für den Gartenbau ist das saisonal stark schwankende Arbeitsangebot und Arbeitsvolumen. Die beschriebenen Belastungen, z.B. ungünstige Körperhaltungen, treten verstärkt in den Ernteperioden bzw. während spezieller saisonaler Pflegearbeiten auf. In diesen Zeiten steigen der Personalbedarf und die Arbeitsintensität erheblich an. Die von den Klimabedingungen abhängige Produktion erfordert eine große Flexibilität, wodurch die Planbarkeit von Arbeitsaufgaben in Termin und Umfang erschwert wird. Lange Arbeitszeiten ergeben sich aus den zum Teil täglich variierenden Arbeitsumfängen, deren Verteilung auf die bereits vor-

handenen Arbeitskräfte einfacher ist, als eine Anpassung in der Anzahl der Arbeitskräfte.

Um einen Nachweis für eine Ursache eines gesundheitlichen Schadens zu führen, der aus hoher Belastung bei der Ausführung variierender Saisonarbeiten resultiert, ist eine lange Expositionszeit erforderlich. Die Beweisführung scheint daher bei Saisonarbeit insbesondere aufgrund der Personalfuktuation unmöglich oder mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Es ist zudem eine grenzüberschreitende Problematik.

Die Auswahl betrieblicher Ausstattungen erfolgt aufgrund des hohen Wettbewerbsdrucks vor allem nach den verursachenden Kosten oder dem erzielten Arbeitsergebnis. Ein Vorteilsvergleich hinsichtlich dieser Ziele ist durch die vorhandenen Wertgrößen wie Ausgaben, Kosten oder Erlöse leicht durchzuführen (Elias 1985). Bei der Entscheidungsfindung über den Kauf einer Maschine sind die Betriebsinhaber und Führungskräfte oft auf sich selbst gestellt (Rohlfing 2001). Weitere Kriterien, wie beispielsweise der Arbeits- und Gesundheitsschutz, werden im Allgemeinen nur dann in die Überlegungen miteinbezogen, wenn sie als gesetzliche Vorgaben definiert oder wirtschaftlich erkennbar von Vorteil sind (Gröger 2002).

Ein anderes Problem ist, dass häufig betriebsspezifische technische Einzellösungen gefertigt werden, die ohne lange Entwicklungsphasen und oft unter Vernachlässigung ergonomischer Kriterien in den Produktionsprozess integriert werden. Finanzielle Mittel für die Forschung und Entwicklung von Arbeitssystemen stehen Gartenbaubetrieben in nur geringem Umfang zur Verfügung. So ist beispielsweise der Einsatz eines computerunterstützten Menschmodells in der Entwicklung eines universellen Teils wie einem Traktorsitz (Reid 1985) noch denkbar und bereits diskutiert worden, für die Verbesserung von Spezialtechnik, wie beispielsweise Spargelernteilfen, für den Hersteller wirtschaftlich nicht tragbar.

Bei einer Vielzahl von praktischen Gestaltungsproblemen kann hingegen festgestellt werden, dass zwar Erkenntnisse zur Problemlösung vorhanden sind, diese im konkreten Anwendungsfall aber keine Berücksichtigung finden (Bruder 1993), obwohl positive Veränderungen in der Reduzierung von Ausführungszeiten durch regelgerechte ergonomische Gestaltung nachweisbar sind (Jakob 2003). Das niedrige Lohnniveau, eine geringe aus den Produkten erzielte Wertschöpfung so-

wie der zeitlich begrenzte Rahmen der Ausübung verschiedener Tätigkeiten sind Gründe für das häufig anzutreffende Minimum an gestalterischen Maßnahmen. Allgemein beschreiben Laurig und Rombach (1989) die Diskrepanz zwischen vorliegendem und angewandtem Wissen folgendermaßen:

- Die fehlende Zusammenstellung von Erkenntnissen, die arbeitswissenschaftliche Experten und Anwender in der betrieblichen Problemlösung benötigen.
- Die Darstellung von Erkenntnissen in einer dem betrieblichen Anwender unverständlichen Form.
- Die Schwierigkeit für den betrieblichen Fachmann seine Probleme so zu formulieren, dass ein Vergleich mit vorhandenen Erkenntnissen, die Lösungsvorschläge für ähnliche Problemstellungen beschreiben, möglich ist.

Trotz der rasanten technischen Entwicklung werden aus den genannten Gründen auch im modernen Gartenbaubetrieb noch viele Arbeiten von Hand erledigt. Gleichzeitig steigen die Leistungen der vorhandenen Ernte- und Aufbereitungstechniken kontinuierlich, wie beispielsweise die von Wasch- oder Sortiermaschinen. Ihre Auslastung wird immer stärker durch den Menschen begrenzt (Jakob 2004). Die Weiterentwicklungen an der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine sind dagegen kaum spürbar bzw. weisen einen aktuellen Forschungsbedarf auf.

Nach Betrachtung der Gesamtsituation entsteht die Forderung nach einem Instrument, mit dem der Optimierungsprozess ganzheitlich erfolgen kann, welches dem Beobachter objektive Vergleichskriterien liefert und das möglichst vielseitig, einfach und kostengünstig für die Verbesserung der Arbeitsbedingungen im Produktionsgartenbau und ähnlichen Bereichen eingesetzt werden kann.

## **2.2 Grundlagen der arbeitswissenschaftlichen Beurteilung**

Die Beurteilung von Arbeitsbedingungen erfolgt aufgrund der Beschreibung dieser unter Benennung von Teilbelastungen und ihrer Bewertung durch Vergleich mit geeigneten Skalen der Belastung und Beanspruchung. Der Grundgedanke des

Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts basiert auf einer Analogie zur technischen Mechanik. Belastungen sind in der Mechanik die äußeren Einwirkungen auf ein Bauteil, die daraus resultierenden inneren Spannungen etc. werden als Beanspruchung bezeichnet.

Beurteilungen innerhalb des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts setzen voraus, dass man sich über die Kriterien, welche die Basis für die Beurteilung bilden, im voraus einigt. Sie sind in eine Ordnung zu bringen, die aufeinander aufbaut. Diese Ordnung erfolgt in der Regel nach der Kerndefinition der Arbeitswissenschaften, herausgegeben 1987 von der Deutschen Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA):

1. Schädigungslosigkeit und Erträglichkeit
2. Ausführbarkeit von Tätigkeiten
3. Zumutbarkeit und Beeinträchtigungsfreiheit
4. Zufriedenheit der Arbeitenden und Förderung der Persönlichkeit durch die Arbeit
5. Sozialverträglichkeit der Arbeit und Möglichkeit der Beteiligung der Arbeitenden an der Gestaltung

...sind zu gewährleisten.

Es handelt sich bei diesen fünf Kriterien um eine Ergänzung der zuvor beschriebenen Hierarchieskala von Rohmert. Diese auf verschiedene Ebenen aufgebauten Bewertungskonzepte skizzieren einen groben Rahmen in Form von Zielvorstellungen.

Als Anforderung an die Beurteilungskriterien besteht eine hinreichende Anschaulichkeit und Überprüfbarkeit dieser. Die Erfüllung dieser Anforderung stellt sich bereits als schwierig dar. Es ist schwer überprüfbar, inwieweit Aufgaben zumutbar sind, beeinträchtigungsfrei ausführbar sind oder sogar persönlichkeitsfördernd wirken.

Werden die Arbeitsbedingungen nach Verordnungen und Regeln der Technik beurteilt, so berücksichtigen diese nur Belastungen. Im Gegensatz dazu müssen für die Beurteilung von Beanspruchung Kenntnisse über die individuellen Eigenschaften bestehen.

Um die Arbeitsbedingungen konkret zu bewerten, kann man nach verschiedenen Prinzipien vorgehen. Die Bestimmung von Sollwerten kann sicherstellen, dass sich bestimmte quantifizierbare Merkmale (z.B. die Raumtemperatur) innerhalb der festgelegten Grenzen bewegen. Für andere, ebenfalls quantifizierbare Größen, gibt es keinen Idealbereich, sondern stattdessen werden Grenzwerte festgelegt, deren überschreiten nachweislich schädlich ist. Dies betrifft beispielsweise Lärm oder das Auftreten gesundheitsschädlicher Stoffe in der Raumluft. Soll- oder Grenzwerte werden in den gängigen Regelwerken festgelegt.

Die Vielfalt möglicher Arbeitsaufgaben und der daraus resultierenden Teilbelastungen macht es bisher unmöglich, allgemeingültige Kriterien für eine zumutbare Höhe der Belastung anzugeben. Der Begriff der Dauerleistungsgrenze ist ein erster Ansatz zur Lösung dieses Problems. Je nach Art und Umfang der Belastung kann durch regelmäßige Pausen ein Vorgang von Ermüdung und Erholung lange Zeit im Gleichgewicht gehalten werden. Als Dauerleistungsgrenze bezeichnet man die höchste noch mögliche Leistung, die ohne zusätzliche Erholungspausen über einen Arbeitstag hinweg abgegeben werden kann. Eine Tätigkeit im Rahmen der Dauerleistungsgrenzen gewährleistet, dass nach Arbeitsende die Erholungsdauer gering bleibt bzw. die Restermüdung vernachlässigbar ist.

Die Bestimmung der Dauerleistung hingegen ist schwierig, da sie sich aus den verschiedenen aus der Arbeitsaufgabe resultierenden Teilbelastungen zusammensetzt, die sich im Bereich der gartenbaulichen Produktion in Abhängigkeit von zahlreichen Faktoren dynamisch verändern. Die Teilbelastungen müssen in ihrer Gesamtheit vom Beobachter nicht nur richtig erkannt, sondern auch beurteilt werden. Die aus einer Belastung resultierende Beanspruchung ist nicht direkt messbar, sondern kann nur anhand von geeigneten Messgrößen abgeschätzt werden.

Als Methoden der Beanspruchungsmessung sind die Messung des Sauerstoffverbrauchs, des Blutdrucks, der Atemfrequenz oder die Elektromyographie geeignet (Schnauber & Zerlett 1984). Ein ebenfalls wichtiger Indikator für die Beanspruchung ist die Herzfrequenz (Burzik & Knuth 1981), die mit mobilen Messeinrichtungen heute leicht zu erfassen ist. Sie spiegelt den Einfluss aller Belastungsfaktoren auf den Organismus wider und unterliegt den individuellen Eigenschaften. Ins-

besondere die Bewertung der Erträglichkeit einer Arbeit erfordert Beanspruchungsanalysen.

Entsprechend dem breiten Spektrum arbeitswissenschaftlicher Fragestellungen wird eine Vielzahl von Methoden zur Beantwortung eingesetzt.

Die bisher entwickelten Verfahren zur Ermittlung von äußeren Belastungsgrößen bei beruflichen Tätigkeiten lassen sich in fünf Gruppen einordnen:

1. Fragebögen
2. Tätigkeitsanalysen durch Beobachtungspersonen
3. Video- und Filmanalysen
4. Weitere bildgebende Verfahren
5. Personengebundene Meßsysteme

### *1. Fragebögen*

Befragungen sind vor allem gekennzeichnet durch den hohen Anteil an Subjektivität. Die nachträgliche Schätzung liefert ungenaue Angaben und repräsentiert nicht das tatsächliche Belastungsprofil. Auf der anderen Seite ist es im Rahmen arbeitswissenschaftlicher Arbeitsplatzanalysen heute praktisch als Kunstfehler anzusehen, die Meinung des Arbeitsplatzinhabers nicht in die Beurteilung einzubeziehen (Hettinger & Wobbe 1993). Die subjektive Aussage des Probanden muss nicht mit dem Ergebnis physikalischer oder physiologischer Messungen in Einklang stehen. Sie wird beeinflusst durch die psychische Ausgangslage des Probanden, seinen Gesundheitszustand und seine Motivationslage (Hettinger & Wobbe 1993): Die Beurteilung durch den Probanden erfolgt in der Regel anhand leicht verständlicher, mehrstufiger Skalen.

Fragebögen sind häufig die einzige Möglichkeit, berufliche Belastungen zu erfassen. Sie bilden die Grundlage für das Aufdecken von Risikofaktoren, die dann durch weitere Maßnahmen in ihrem Ausmaß bewertet werden können. Eine repräsentative Umfrage innerhalb einer Berufsgruppe zeigt schnell den bestehenden Handlungsbedarf auf. Die Reliabilität von Befragungen variiert sehr stark zwischen den zu bewertenden Bereichen. Woodcock Webb (in Aghazadeh 1988) fand heraus, dass sich bei der Bewertung der Belastung durch bestimmte Körperhaltungen

die höchsten Abweichungen ergaben. Dies galt sowohl für die von den Arbeitskräfte selbst durchgeführten Bewertungen als auch für die Bewertung seitens der Ergonomen.

## *2. Gruppe der Tätigkeitsanalysen*

Zur Gruppe der Tätigkeitsanalysen zählen unter anderem *OWAS* (Ovako Working Posture Analysing System, 1974 in Finnland entstanden) und *AET* (Arbeitswissenschaftliches Erhebungsverfahren zur Tätigkeitsanalyse).

Die OWAS-Methode gilt als schnell durchführbares Verfahren zur Ermittlung von Körperhaltungen. Sie wurde schon oft in der Praxis eingesetzt, z.B. im Baugewerbe, in Autowerkstätten und im Krankenhaus, aber auch in der Landwirtschaft. Die Ergebnisse können zur Umgestaltung des Arbeitsplatzes und/oder der Arbeitsorganisation herangezogen werden. Anhand einfacher Bilder wird die Stellung verschiedener Körperteile mit Nummern belegt und in definierter Reihenfolge genannt. Daraus ergibt sich der jeweilige OWAS-Code, der dann in Maßnahmenklassen eingeordnet wird, welche die Dringlichkeit einer Umgestaltung ausdrücken (Stoffert 1985). In Verbindung mit dem BIA-Meßsystem (Ellegast 1998, Kupfer 1998) wurde eine automatisierte OWAS-Analyse realisiert, die erhebliche Vorteile bringt. Neben der zeitlichen Ersparnis entfällt der methodische Fehler durch Wegfall der manuellen Bestimmung von Haltungscodi durch den Beobachter. Das BIA-Meßsysteme ist ein personengebundenes Meßsystem, das für die Erfassung wirbelsäulenrelevanter Belastungsgrößen am Arbeitsplatz entwickelt wurde.

Das zweite wichtige Verfahren in der Gruppe der Tätigkeitsanalysen ist das Arbeitswissenschaftliche Erhebungsverfahren (AET), welches als Ersatz aufwendiger physiologischer und physikalischer Messungen konzipiert wurde (Rohmert & Landau 1979). In drei Teilschritten werden eine Arbeitssystemanalyse, eine Aufgabenanalyse und eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Am Ende erhält man einen Belastungsvergleich verschiedener Arbeitsplätze

### *3. Video- und Filmanalysen*

Die Dokumentation von Arbeitsabläufen auf Video oder Film ermöglicht eine beliebig oft wiederholbare Ansicht der eingenommenen Körperhaltungen sowie den Einsatz von Menschenschablonen zur genaueren Ermittlung von Winkelmaßen.

### *4. Weitere bildgebende Verfahren*

Zur Gruppe der weiteren bildgebenden Verfahren zählt die Bewegungsanalyse mit Hilfe von an der Person befestigten Markern. Man unterscheidet die Methoden unter anderem nach der Markierung repräsentativer Punkte. Es gibt Systeme, deren Marker Signale aussenden und in anderen Systemen werden passive Marker nachträglich bildoptisch verfolgt. Diese Arten der Bewegungsanalysen sind besonders für ortsfeste Arbeitsplätze innerhalb eines kalibrierten Raumes geeignet.

### *5. Personengebundene Messsysteme*

Personengebundene Meßsysteme basieren auf Sensortechnik, z.B. Winkelsensoren oder Druckmessplatten. Diese sind mitsamt ihrer Aufzeichnungs- und Energieversorgungseinheit am Körper der Probanden zu befestigen. Sie sind vielseitig einsetzbar, setzen jedoch voraus, dass die Sensorik den Probanden bei seiner Arbeit nicht behindert und über ausreichend lange Messzeiten reproduzierbare Daten liefert.

Ziel arbeitswissenschaftlicher Untersuchungen ist die Erhebung aussagekräftiger und möglichst objektiver Daten. Die Grenzen und Möglichkeiten der Untersuchungen mit Hilfe der dreidimensionalen Bewegungsanalyse werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.



### 3 Bewegungsanalyse

#### 3.1 Rückblick auf die Entwicklung der Bewegungsanalyse

Mitte des 19. Jahrhunderts befassten sich die Gebrüder Weber (1836) mit einer Gangstudie, die auf einfacher Beobachtung basierte. Ende des 19. Jahrhunderts bediente man sich der Photographie um die menschliche Bewegung aufzuzeichnen. Beispielsweise Muybridge (Nachdruck 1979) verwendete in den Vereinigten Staaten Serienaufnahmen, um die Bewegungen von Tieren in einzelne Phasen zu zerlegen.

In Frankreich bedienten sich Marey (1895, 1899) und seine Gruppe einer anderen Art der Dokumentation. Sie ließen Probanden einen mit weißen Leuchstreifen präparierten schwarzen Anzug tragen. Die Leuchstreifen stellten die Verbindung zwischen den Gelenken des Arms und des Beins dar. Mittels „Chronographie“ wurde eine Bildplatte bis zu 20 mal pro Sekunde belichtet und die Position der Leuchstreifen ausgewertet.

Mittels „Cyclographie“ zeichnete Bernstein (1927) in den zwanziger und dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts die menschliche Bewegung auf. Dazu wurden kleine Glühbirnen an verschiedenen Stellen des Körpers angebracht. Bei der Bewegung erschienen dann diese Lichter als Linien auf dem belichteten Bild. Auf der Basis dieser Methode entwickelte Bernstein (1930) ein dreidimensionales Bewegungsmessverfahren, indem er zusätzlich zu seiner Kamera einen Spiegel benutzte.

Die Weiterentwicklung dieser klassischen Bewegungsregistrierungen, die auf Dunkelheit angewiesen waren, ist in der Motografie zu sehen. Baum (1983) definiert sie als berührungslose Bewegungsaufzeichnung mit Hilfe von Strahlungsspuren. Die Verwendung von Infrarottechnik und Bandabsorptionsverfahren ermöglichte Aufzeichnungen im Hellen.

Im Zuge des technischen Fortschritts entwickelten sich somit die Beobachtungsmethoden von der reinen beobachtenden Beschreibung, über fotografische Aufzeichnungen mit immer höheren Aufzeichnungsfrequenzen bis zu einer millimetergenauen Ortung von markierten Körperpunkten im Raum (siehe Tab. 1).

Mit über 200 Knochen ist das Skelett des Menschen ein sehr komplexes System. Es ist daher fast unmöglich, menschliche Bewegungen in Form biomechanischer Gleichungssysteme darzustellen. Stattdessen werden die Probleme einzeln betrachtet und in ihrer Orts- und Lageveränderung beschrieben. Dennoch darf nicht vergessen werden, dass die Bewegung jedes einzelnen Körperteils einen Einfluss auf den gesamten Bewegungsapparat hat. Beim Ausstrecken eines Armes muss nicht nur diese Bewegung gesteuert werden, sondern gleichzeitig muss das Gleichgewicht des ganzen Körpers stabilisiert werden.

Die technische Weiterentwicklung der beschriebenen Methoden reduzierte den Einfluss der Messungen auf den Bewegungsablauf erheblich. Die ersten Mehrfachbelichtungen mussten noch im abgedunkelten Raum stattfinden, heute wird unter normalen Lichtverhältnissen gemessen. In der Medizin wurden lange Zeit röntgenologische Untersuchungen an Patienten durchgeführt, um Bewegungsstörungen an der Wirbelsäule zu erfassen (Kolland 1999). Die Probanden waren einer hohen Strahlenbelastung ausgesetzt. Heute verwendet man Oberflächenmarker, die Strahlenbelastung der Patienten entfällt (Powell 2000).

Im Rahmen einer modernen, computergestützten Bewegungsanalyse können einerseits am Körper befestigte Signalgeber geortet und digital aufgezeichnet werden. Die zweite Möglichkeit ist die Verwendung passiver Marker, deren Lage aus Videoaufzeichnung nachträglich über Mustererkennungsalgorithmen bestimmt wird. Eine Übersicht computergestützter Methoden zur Bewegungsanalyse wurde von Thomas (1995) veröffentlicht. Die in Tabelle 1 aufgeführten Methoden unterscheiden sich somit in der Art der Bewegungsaufzeichnung sowie in ihrer anschließenden Beschreibung. Die aus dem Grundgedanken der Motografie und Cyclographie resultierende Entwicklung von aktiven Markern (Extrac, Zebris, I-sotrac) liefert 3-D-Raumkoordinaten, aus denen beliebige Größen berechnet werden können. Das „shape tape“ der Firma Measurand liefert lediglich die Veränderung der Punkte innerhalb des Messsystems.

Bei der Bewegungsanalyse wird die Bewegung eines Körpers in seinem Bezugssystem erfasst und in ihre Komponenten zerlegt. Man versucht, die wirkenden Kräfte und die bewegungsabhängigen Größen zu erkennen.

Systeme, die bestimmte Signalgeber orten, aufzeichnen und ihre Lage in Form von dreidimensionalen Raumkoordinaten beschreiben, sind eine Weiterentwicklung in Richtung der objektiven Bewertung von Bewegungen, weil diese nicht nur subjektiv beschrieben, sondern auch quantitativ mit Hilfe der aus den Raumkoordinaten errechneten Indikatoren ausgewertet werden können. Alle bisher verfügbaren Systeme (siehe Tabelle 1) setzen die direkte Sichtbarkeit bzw. Ortung der Marker voraus. Ein Verdecken von Markern zum Aufnahmezeitpunkt oder eine Überlagerung von Signalen erfordert in der Auswertung die Interpolation der fehlenden Messwerte.

Tabelle 1: : Auswahl von Methoden zur Aufzeichnung von Bewegungslinien

<b>Methode</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Art der Datenerfassung</b>	<b>Erfasste Merkmale</b>
Motografie		Spurbilder durch Langzeitbelichtung, analog	Bewegungslinie der beleuchteten Punkte
Online-Motografie Bzw. Extrac	Wenthe/Thiedig, Braunschweig	Digitale Erfassung der Raumkoordinaten von IR-Leuchtdioden	Bewegungslinien, Raumkoordinaten, Video
Elektromagnetische Bewegungsanalyse	Isotrak II, Polhemus Inc., Colchester, VT (Datta 2001)	Digitale Erfassung der Raumkoordinaten über elektromagnetische Marker	Raumkoordinaten
ZEBRIS	Zebris Medizintechnik GmbH, Isny	Digitale Erfassung der Raumkoordinaten von Ultraschallsendern	Bewegungslinien, Raumkoordinaten
Analyse	Mikromak GmbH, Erlangen	Software zur Verfolgung von Markern auf digitalen Videosequenzen	Bewegungslinien, Berechnung von Raumkoordinaten
Covilas (Computer-Video Laufanalyse)	www.ietec.de		
VICON (Delleman 1990)	www.vicon.com		
Measurand „Shape Tape“	Fa. Measurand, Fredericton, Canada www.measurand.com	Faser optischer Sensor, digital	Bewegungsbild, Raumkoordinaten innerhalb des Messkörpers

Die Aufnahmefrequenz der Markerposition und die Lagegenauigkeit der Raumkoordinaten sind charakteristische Größen einer Methode, ebenso wie die erfassten

Merkmale und die Art ihrer Darstellung. Die Qualität einer Bewegungsanalyse ist vor allem davon abhängig, wie die Bilder und Lagekoordinaten interpretiert werden und anhand welcher Körperpunkte bzw. charakteristischer Verbindungslinien quantitative Aussagen getroffen werden. Eine Transparenz der Methode sowie der für die Berechnung verwendeten Algorithmen ist für die Interpretation der Ergebnisse ein wesentlicher Bestandteil.

Die Durchsicht der Literatur ergab ein breites Anwendungsspektrum für die modernen Formen der Bewegungsanalyse (siehe auch 3.2). Im Vordergrund steht die Bewertung von Bewegungsabläufen in Abhängigkeit vom Gesundheits- oder Trainingszustand einer Person oder dem verwendeten Material (z.B. Laufschuh oder Prothese).

Eine arbeitswissenschaftliche Gesamtbeurteilung von Bewegungsabläufen verlangt andere Bewertungsgrundlagen.

Innerhalb eines Arbeitssystems wirkt der Mensch über seine Bewegungsabläufe mittelbar oder unmittelbar auf die Arbeitsgegenstände ein. Die Bewegungsgestaltung verfolgt dabei mehrere Ziele:

- Reduzierung psychischer Beanspruchung und Vermeiden von Fehlhandlungen
- Reduzierung physischer Beanspruchung und Verbesserung von Arbeitsergebnissen
- Reduzierung von Ausführungszeiten
- Qualitätssicherung durch Ausschließen von Fehlern
- Vermeiden von Unfällen

### **3.2 Einsatz der Bewegungsanalyse in der Medizin und im Sport**

Im Bereich der Medizin und im Sport ist die Bewegungsanalyse bereits ein fester Bestandteil geworden.

Im Bereich Sport dient die Bewegungsanalyse dem Athleten der Selbstkontrolle und ständigen Verbesserung seiner erlernten Bewegungsmuster.

In fast allen Sportarten ist die technisch korrekte Bewegungskorrektur ein wesentlicher Bestandteil der sportlichen Gesamtleistung und letztlich Bedingung des sportlichen Erfolgs.

Sportler nutzen Videoaufzeichnungen, um ihre sportartspezifischen Techniken zu verbessern. Die Auswertung digitaler Videoaufzeichnungen unter Verwendung von Oberflächenmarkern ist eine im Techniktraining vielfach eingesetzte und geeignete Methode. Durch Verbinden der Marker in der Auswertung lassen sich Strichfiguren generieren, deren Darstellung das Verständnis der Bewegungsabläufe verbessert. Anhand dieser Linien können beispielsweise Winkelveränderungen in den verschiedenen Phasen der Bewegung beobachtet und quantifiziert werden. Das Erlernen spezieller Techniken ist eine wesentliche Zielsetzung im Bereich des sportlichen Trainings.

Neben der Ausführungstechnik einer Bewegung ist der Einfluss verwendeter Sportgeräte sowie deren Materialeigenschaften (z.B. Laufschuh) auf das Ergebnis von großem Interesse. Stallkamp (1998) untersuchte beispielsweise die Bewegung des Inline-Skatens bei Verwendung zweier verschiedener Schuhe. Verwendet wurden Hochgeschwindigkeits-Videokameras und stark reflektierende Marker, die später bildoptisch verfolgt wurden.

Reinisch (1993) untersuchte verschiedene Sportschuhe auf dem Laufband und auf Grasboden mit der Bewegungsanalyse und per Druckverteilungsmessung.

Die Laufbandanalyse beim Kauf von Sportschuhen findet man heute bereits vielfach als Serviceleistung im Sportgeschäft. Mit Hilfe von Videoaufnahmen kann so unter Bewertung der Pronation und Supination des Fußes im Bewegungsablauf der geeignetste Schuh ausgesucht werden. In der Orthopädie werden solche Aufnahmen durchgeführt, um beispielsweise Einlagen anzupassen.

Lunagné (1999) zweifelt die Aussagekraft der auf Markern basierenden Ergebnisse zur Nachbildung von Körpersegmenten an und entwickelte eine Methode, die auf Videoaufzeichnungen und einem 3-D-Tiefensensor basiert. Seine Methode soll weiterhin mögliche Einflüsse von Markern auf die Bewegungen eliminieren, auf einfachen Aufzeichnungssystemen basieren und die Anwendung unter Praxisbedingungen ermöglichen.

Als weiteres Einsatzgebiet der Bewegungsanalyse ist die Medizin zu nennen. Neben der Ganganalyse auf dem Laufband werden in der Medizin vermehrt Systeme

mit aktiven Markern eingesetzt. Diese erreichen eine hohe Genauigkeit der Raumkoordinaten von bis zu 1 mm. Schreiber (1989) beschreibt die apparative Funktionsdiagnostik des Bewegungsapparates, Kolland (1999) bewertet Bewegungen von gesunden und wegen Bandscheibenvorfalles operierten Patienten und Datta (2001) trifft sogar Aussagen zum Können von Chirurgen mit Hilfe der dreidimensionalen Bewegungsanalyse. Hoeland (1998) überprüft die Eignung des physikalischen Signals der Bewegungsanalyse zur Anpassung der Stimulationsfrequenz von Herzschrittmachern.

Im Bereich der Rehabilitation sind regelmäßige bewegungsanalytische Untersuchungen Kontrollparameter für den Erfolg der durchgeführten operativen oder therapeutischen Maßnahmen.

Sowohl im Sport als auch in der Medizin geht es vor allem um die Erfassung der Korrektheit einer Bewegungsausführung. Entspricht die Körperhaltung über den gesamten Bewegungsablauf den Idealvorstellungen? Wie bewegt sich ein Kranker im Vergleich zum gesunden Menschen? Warum führt der eine Bewegungsablauf zu einem besseren Ergebnis als der andere?

In der Regel werden immer nur kurze Sequenzen betrachtet, wie beispielsweise der unten dargestellte Verlauf eines Standspagats in der rhythmischen Sportgymnastik.

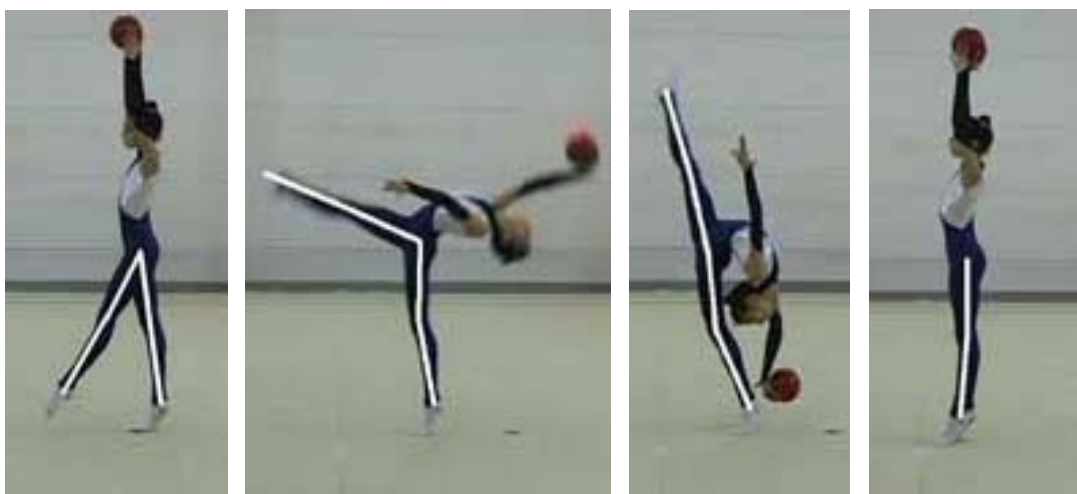


Abb. 1: Ablauf eines Standspagats

(Quelle: <http://www.bochum.de/osp/ins3c2.htm>)

### 3.3 Einsatz der Bewegungsanalyse in der Arbeitswissenschaft

Ein intensiver Einsatz der Bewegungsanalyse in der Arbeitswissenschaft erfolgte bereits vor der digitalen Erfassung aktiver Marker. Die eingesetzte Methode, bekannt unter dem Oberbegriff Motografie, ist in einer Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz (Baum 1980, 1983, 1986) in den 80'er Jahren ausführlich beschrieben worden. In der Industrie konnten mit diesem Verfahren große Erfolge bei der Optimierung von manuellen Arbeitsverfahren erzielt werden. Ein Problem der Methode waren jedoch eingeschränkte Lichtverhältnisse und die im Vergleich zu den aktuellen digitalen Methoden ungenaue und zeitaufwendige Ermittlung von Weglängen über die Vermessung mitfotografierter Raster sowie ein hoher Bedarf an Filmmaterial für die Aufnahme längerer Sequenzen. Die Folge daraus war eine geringe Anzahl an Wiederholungen und somit die mangelnde statistische Absicherung der Ergebnisse.

Im Zuge des technischen Fortschritts wurden viele Handarbeitsplätze in der Industrie durch Maschinen ersetzt. Die Frage der rationellen Gestaltung ist somit in den Hintergrund gerückt. Die Aufgabenbereiche des Menschen im modernen Produktionsbetrieb verlagern sich in Richtung Überwachung der Maschinen. Die technische Weiterentwicklung in Form digitaler Bewegungsaufzeichnungen kam für die industrielle Arbeitsplatzgestaltung nicht mehr zum Tragen.

Aufgrund der gewandelten Produktionsbedingungen ergeben sich neue Anforderungen an die Arbeitsgestaltung. Sie bestehen unter anderem in einer funktionalen Gestaltung von Bedienfeldern an Maschinen oder Benutzeroberflächen von computergesteuerten Geräten und in der Untersuchung sicherheitsrelevanter Aspekte bei der Anordnung von Bedienteilen in Fahr- und Flugzeugen. Die Verwendung von CAD-Programmen macht es möglich, computergestützte Menschmodelle (z.B. RAMSIS) in Maschinenkonstruktionen maßstabsgetreu einzusetzen und die Konstruktionen ergonomisch zu gestalten. Innerhalb der untersuchten Bewegungsräume können Bewegungssimulationen erfolgen, aus denen Sicherheit oder Komfort bewertet werden. Auf der Basis anthropometrischer Grunddaten werden so statische Arbeitsräume computertechnisch verbessert bzw. grundlegend gestaltet.

Die aktuellen weltweiten Bemühungen bestehen in der Entwicklung von computergestützten Menschmodellen zur gesicherten Vorhersage von Diskomfort aufgrund von Bewegungen und Körperhaltungen (Bubb 2003; Chaffin et al. 2003). Die Grundlagen der Bewegungssimulation basieren auf Regressionsanalysen beobachteter Bewegungsmuster. Erfolgreiche Vorhersagen erfordern daher die Durchführung umfangreicher bewegungsanalytischer Untersuchungen.

Erste Analysen von Elementarbewegungen gehen auf F.W. Taylor (1865-1915) sowie auf F.B. Gilbreth (1886-1924) zurück (in Luczak 1993). Auf diesen Untersuchungen basierte die spätere Entwicklung von Systemen vorbestimmter Zeit (SvZ), wie z.B. das Work-Factor-System (WF) oder das Methods Time Measurement (MTM) (Luczak 1993).

Im Bereich immer noch bestehender handarbeitsintensiver Produktionen, wie dem Gartenbau, werden die modernen Möglichkeiten der Bewegungsanalyse kaum oder gar nicht genutzt. In der Literatur sind nur vereinzelte aktuelle Beispiele zu finden (Guggenbühl 1987; Haslegrave 1990; Jakob 2003). Ein Einsatz der in der Medizin und im Sport verwendeten Methoden ist möglich. Es fehlt jedoch an Auswertefunktionen, um die für arbeitswissenschaftliche Fragestellungen relevanten Daten zu liefern, da in diesen Bereichen die Fragestellungen anders gelagert sind. Im Rahmen umfangreicher Untersuchungen wurde am Institut für Agrartechnik für ein vorhandenes Bewegungsanalysesystem eine Auswertesoftware entwickelt, die nach arbeitswissenschaftlichen Kriterien gestaltet ist.



## 4 Methodenentwicklung

Basierend auf dem unter 4.1 beschriebenen Meßsystem wurde ein Methode entwickelt, um arbeitswissenschaftliche Fragestellungen anhand objektiver Kennwerte zu beantworten.

### 4.1 Beschreibung der Messtechnik

Das für die Untersuchungen verwendete Echtzeit-Bewegungsanalysesystem (Extrac) wurde von der Firma Wente/Thiedig (Braunschweig) Anfang der 90'er Jahre entwickelt.



Abb. 2: Aluminium-Profil mit Messkameras (CCD-Kameras links und rechts, Videokamera Mitte)

Mit Hilfe von an der Versuchsperson befestigten Infrarot-Leuchtdioden werden die Bewegungen ausgewählter Punkte aufgezeichnet. Die Aufzeichnung erfolgt mit einer Gesamtfrequenz von 50 Hz, es können maximal acht Leuchtdioden verwendet werden. Diese blitzen nacheinander auf und werden optisch registriert, wofür eine Kabelverbindung der Dioden mit dem Signalgeber notwendig ist. Je mehr Leuchtdioden verwendet werden, desto niedriger ist die Aufzeichnungsfrequenz der einzelnen Dioden ( $\text{Gesamtfrequenz} / \text{Anzahl verwendeter Dioden} = \text{Aufzeichnungsfrequenz der einzelnen Diode}$ ). Im sogenannten Multiplex-Modus können die Leuchtdioden in 16 Schritten einzeln angewählt werden, wodurch sie verschieden häufig aufleuchten. Dadurch können Prioritäten gesetzt oder es kann unterschiedlichen Bewegungsgeschwindigkeiten Rechnung getragen werden. Die Einzelfrequenz muss dann für jeden Marker entsprechend berechnet werden.

Die Aufnahme der Lichtpulse erfolgt über zwei CCD-Kameras, die links und rechts in ein Aluminium-Profil eingebaut sind (Abbildung 1). Der Abstand zwischen den beiden Kameras beträgt 1760 mm.

Eine erfolgreiche Aufnahme einer Raumkoordinate setzt die Sichtbarkeit der Leuchtdiode für beide Kameras voraus. Diese Voraussetzung stellt sich als limitierende und für den Erfolg wesentlich verantwortliche Größe dar.

In die Mitte des Aluminium-Profils ist eine Videokamera eingebaut, die den Arbeitsvorgang ebenfalls aufzeichnet. Jede der ermittelten Raumkoordinaten ist durch einen Zahlencode gekennzeichnet, der ursprünglich, übereinstimmend mit dem Timecode des Videorecorders, innerhalb der Systemsoftware ein sekunden-genaues Wiederfinden der entsprechenden Videosequenz für einen Punkt der Bewegungslinie ermöglichen sollte (wurde vom Hersteller leider nicht realisiert). Jedes beliebige Videobild kann als Standbild gespeichert und mit einem ausgewählten Bewegungsspurbild überlagert werden.

Die Raumkoordinaten werden im ASCII-Format vom System gespeichert. Innerhalb des Systems lassen sich die Bewegungslinien zweidimensional in zwei Ansichten betrachten. Jeder Kanal erhält eine eigene Farbe. Ein Messprotokoll gibt Informationen über die benötigte Zeitdauer und den prozentualen Anteil aller sichtbaren Messpunkte, der jedoch wenig Aussagekraft besitzt. Erst eine separate Betrachtung der sichtbaren Messpunkte für die einzelnen Kanäle ermöglicht die Beurteilung der Messgüte für die einzelnen Marker.

Das Kameramodul ist an einen die Koordinaten generierenden Computer angeschlossen, der seine Ergebnisse an einen weiteren PC leitet, auf dem die Systemsoftware installiert ist.

Das als Online-Motografie bezeichnete System zeigt bereits während der Messung die aufgezeichneten Punkte auf dem Bildschirm an, so dass eine erste Kontrolle der Erfassung bzw. eventueller Fehlmessungen online möglich ist.

Das beschriebene System trägt der Voraussetzung für eine moderne arbeitswissenschaftliche Messmethode, die eine nur geringe oder keine Einflussnahme der Methode auf den Arbeitsablauf erlaubt, durchaus Rechnung.

Der Einsatz beschränkt sich auf ortsfeste Arbeitsplätze innerhalb des kalibrierten Raumes.

## 4.2 Vorgehensweise

Das Vorgehen bei der Durchführung einer Bewegungsanalyse hängt sowohl von der Art der untersuchten Arbeitsaufgaben als auch vom Untersuchungsziel ab. Im Mittelpunkt der Analyse steht die Beobachtung des Ist-Ablaufes und seine Beschreibung über geeignete Indikatoren. Es können wahlweise bis zu acht Stellen am bewegten Objekt mit Hilfe der Leuchtdioden verfolgt werden. Die Qualität der Ergebnisse ist abhängig von einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Es ist deshalb sinnvoll, in Vorversuchen einige Parameter zu überprüfen, welche im Standardprogramm für die Durchführung von Bewegungsanalysen an ortsfesten Arbeitsplätzen aufgeführt sind (siehe Anhang). Eine exakte Lagebeschreibung der ausgewählten Körperpunkte ist wichtig für die Reproduzierbarkeit und für den Vergleich der Messwerte verschiedener Varianten und Personen.

Zur Bearbeitung und Darstellung der Messwerte wurde eine spezielle Software entwickelt. Die Programmierung der Auswertesoftware nach arbeitswissenschaftlichen Anforderungen erfolgte in der auf die ASCII-Daten zurückgreifenden Programmiersprache IDL (Interactive Data Language, Research Systems, Inc.). Dadurch ist die Auswertesoftware für andere im ASCII-Format vorliegende Raumkoordinaten zu verwenden.

Die neu entwickelte Software gliedert sich in zwei funktionale Bereiche:

Ein Bereich ermöglicht eine umfangreiche grafische Darstellung der Bewegungen, der andere Bereich die Errechnung der Indikatoren. In Abhängigkeit von der Fragestellung werden verschiedene Vergleichsgrößen für die Interpretation der Bewegungen benötigt. Die Beschreibung der Indikatoren unter Nennung der ihnen zugrunde liegenden Algorithmen ist ebenfalls ein wesentlicher Bestandteil für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Kapitel 4.4 beschreibt eine Auswahl der Indikatoren. Der mögliche Informationsgewinn über die definierten Vergleichsgrößen erfolgt ausführlich im Diskussionsteil der Arbeit.

### 4.3 Genauigkeit und Beurteilung der Güte einer Messung

Die erfolgreiche Berechnung einer dreidimensionalen Raumkoordinate setzt voraus, dass die IR-Leuchtdiode zum Aufnahmezeitpunkt von beiden Kameras gesehen wird. Die dritte Dimension wird aus den von zwei Seiten aufgezeichneten Lagen der Dioden errechnet. Die dem System dabei zugrunde liegende Genauigkeit kann nur erreicht werden, wenn sich die Marker bei der Aufzeichnung innerhalb des kalibrierten Raumes befinden.

In dynamischen Prozessen, insbesondere bei Drehbewegungen, lässt sich die Sichtbarkeit des Markers für beide Kameras nicht immer realisieren. Sobald eine Kamera den Lichtblitz der Leuchtdiode nicht erkennen kann, wird keine dreidimensionale Raumkoordinate errechnet. Dadurch entstehen Lücken in den Aufzeichnungen. Fehlende Messwerte können jedoch unbegrenzt interpoliert werden (siehe Anhang, Approximation), die Ergebnisse spiegeln dann nicht die echten Bewegungen wider. Die Beurteilung, ab wann die Menge der Ausfälle nicht mehr akzeptabel ist, obliegt dem Nutzer. Vergleicht man beispielsweise die Ergebnisse der Bewegungssummen aus beiden Interpolations-Algorithmen und stellt eine große Abweichung fest, so ist davon auszugehen, dass die Messgüte gering ist. Je weiter der letzte sichtbare und der erste wieder sichtbare Punkt zeitlich oder bezogen auf den Weg voneinander entfernt sind, desto stärker schlagen sich die verschiedenen, der Interpolation zugrunde gelegten, Rechenwege im Ergebnis nieder. Die beiden Möglichkeiten der Interpolation ergeben größere Unterschiede, wenn Ausfälle über einen längeren Zeitraum auftreten, da die ihnen zugrunde gelegten Algorithmen einmal Strecken bilden und im anderen Falle eine der menschlichen Bewegung entsprechende, gekrümmte Bewegungsbahn berechnet wird.

Die Interpolationsgüte ist im wesentlichen davon abhängig, wie lang und wie bewegungsintensiv die fehlenden Sequenzen waren. Hohe Bewegungsgeschwindigkeiten und eventuelle Richtungsänderungen innerhalb längerer Aufzeichnungslücken können die Ergebnisse verfälschen. Die geschätzten Bewegungen orientieren sich jeweils am letzten und ersten sichtbaren Punkt. Die sogenannte „speed based approximation“ berücksichtigt die jeweiligen Bewegungsgeschwindigkeiten

und –richtungen und berechnet daraus einen elliptischen Linienverlauf. Die „straight approximation“ verbindet den letzten und ersten sichtbaren Punkt auf kürzestem Wege (siehe Anhang).

Besonders häufige Sichtbarkeitsausfälle wurden dann registriert, wenn die Dioden auf den Händen befestigt wurden und diese Drehbewegungen ausführten.

Ein weiteres Problem wird deutlich, wenn ein sehr kleiner Arbeitsbereich mit langsamen Bewegungen untersucht wird. Die Messgenauigkeit der Raumkoordinaten liegt nur bei etwa einem Zentimeter. Bei kleinen Abständen wird eine gerade Bewegung als Zick-zack-Linie abgebildet, weil die vom System errechneten Koordinaten nur innerhalb des die Genauigkeit abbildenden Raumes wiedergefunden werden.

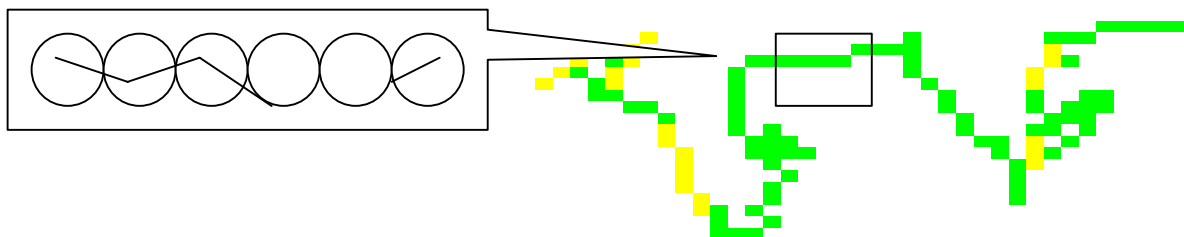


Abb. 3: Beispiel einer „zittrigen“ Bewegungslinie aufgrund hoher Aufzeichnungsfrequenz (50 Hz) und langsamen Bewegungen mit erklärender Ausschnittvergrößerung

In Abbildung 3 wird das Entstehen einer solchen Linie verdeutlicht. Ein zufällig ausgewählter Punkt innerhalb der Kugel wird mit einem Punkt in der nächsten Kugel verbunden. Die Summe aller so entstandenen Strecken ist immer größer als die Summe der Strecken, die sich bei der Verbindung der jeweiligen Kugelmittelpunkte ergeben würde. Die Größe des Kugeldurchmessers wird durch die Genauigkeit des Systems bestimmt.

Der hieraus resultierende Fehler ist um so größer, je geringer der Abstand zwischen zwei Messpunkten ist (siehe Tabelle 2). Er kann sich in einem „zittrigen“ Erscheinungsbild der Bewegungslinien äußern. Diese Ungenauigkeit ist sowohl bei der Versuchsplanung als auch bei der Nutzung der Indikatoren zu berücksichtigen. Eine hohe Genauigkeit (Fehler  $< 1\%$ ) der gemessenen Bewegungssumme ist bereits ab einer Bewegungslänge von 3 cm zwischen den Punkten gegeben,

was ebenfalls aus Tabelle 2 hervorgeht. Da die Aufzeichnungsfrequenz der einzelnen Dioden von der verwendeten Gesamtzahl abhängt, ist bei langsameren Bewegungen eine durch Verwendung aller Dioden reduzierte Frequenz ratsam, um die Abstände zwischen den einzelnen Punkten zu vergrößern. Weiterhin besteht von Seiten des Systems die Möglichkeit, die Lichtblitze unterschiedlich häufig auftreten zu lassen. So kann verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten zwischen den aufgezeichneten Markern Rechnung getragen werden. In einer Messung werden z.B. sieben Marker verwendet, sechs sitzen an den Armen, der siebte am Kopf. Die Arme sind im Arbeitsprozess aktiv, der Kopf weniger. Damit bietet sich an, die Lichtblitze wie folgt zu steuern: 1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6 7.... Diese Reihenfolge wiederholt sich dann im Laufe der Messung. Es sind maximal 16 Schritte möglich. Wichtig ist es dann zu beachten, dass die Aufzeichnungsfrequenz der Marker nicht mehr der Gesamtfrequenz/Anzahl der Marker entspricht.

Tabelle 2: : Prozentuale Zunahme der gemessenen Streckenlänge zum wirklichen Abstand

Tatsächlicher Abstand zwischen zwei Punkten (cm)	Durchschnittlicher gemessener Wert des Systems (cm)	Fehler (%)
0,0	0,51	51,47
0,5	0,69	38,39
1,0	1,10	10,03
1,5	1,57	4,43
2,0	2,05	2,66
2,5	2,54	1,50
3,0	3,03	0,99
4,0	4,03	0,71
5,0	5,02	0,41
6,0	6,02	0,38
7,0	7,02	0,25
8,0	8,01	0,16
9,0	9,01	0,10

Von einer rechnerischen Glättung der auf der Ungenauigkeit basierenden künstlichen Streckenveränderung wurde bisher abgesehen.

Als weiterer Ansatz langsame Bewegungen genau aufzuzeichnen, wurden diese versuchsweise mit Hilfe von Antennen „verstärkt“ (Abbildung 4), d.h. die Bewegungslängen wurden künstlich vergrößert.

Die Verwendung eines solchen Hilfsmittels ist eine Möglichkeit, weniger intensive Bewegungen mit dem vorhandenen System aufzuzeichnen. Die Akzeptanz und der Tragekomfort derartiger Gebilde ist allerdings fragwürdig. Bequemlichkeit und fester Halt am Kopf wirken konträr zur natürlichen Beweglichkeit, ein Gefühl des Verrutschens kann den Probanden in seinen Bewegungen beeinflussen und ein von einem störungsfreien Ablauf abweichendes Bewegungsbild ergeben.



Abb. 4: Darstellung der Antennen zur Bewegungsverstärkung

Neben der vom System begrenzten möglichen Genauigkeit der Ortung von Markern sowie dem Umfang erfolgter Interpolationen sind noch andere Parameter zu

berücksichtigen, beispielsweise die Befestigung der Marker an definierten Punkten.

In der Medizin oder im Sport werden die Marker in der Regel direkt auf der Haut angebracht, das heißt, die Probanden sind an den Stellen unbekleidet, und die Hautstellen können bei Bedarf für Messwiederholungen mit wasserfesten Markern gekennzeichnet werden. Diese Methode ist für einen praxisnahen Einsatz in der Arbeitswissenschaft nicht geeignet. Infolgedessen wurden die Marker bei den Laborversuchen auf der Kleidung angebracht. Das Wiederfinden bestimmter Körperpunkte unter einem Kleidungsstück entspricht jedoch nicht der Genauigkeit einer direkten Anbringung auf der Haut, die sich im Bedarfsfalle, wie bereits erwähnt, markieren lässt. Sowohl Kleidung als auch Haut verschieben sich bei der Bewegung mehr oder weniger stark über den Knochen, die in der Regel als Erkennungspunkte genutzt werden. Ein Kompromiss besteht in möglichst eng anliegender oder auf ein Minimum reduzierte Bekleidung.

Da es sich bei der Interpretation der Ergebnisse nicht um standardisierte Auswertungsgänge handelt, sondern um an die Fragestellung angepasste Einzelfallinterpretationen, sollten die erzielten Ergebnisse eine gewisse Transparenz aufweisen, d.h. methodisch exakt dokumentiert sein. Inhalt dieser Dokumentation ist die Erfassung der anthropometrischen Grunddaten der untersuchten Probanden, die zum einen für die Berechnung bestimmter Indikatoren bekannt sein müssen und die zum anderen die Bewertungsbasis für die Übertragbarkeit von Messergebnissen sind.

Die Güte einer jeden Messung unterliegt somit dem Produkt einer Vielzahl von Einflussfaktoren, das sich aus der Genauigkeit des Systems, der Versuchsdurchführung und den Berechnungsfunktionen ergibt. Als besonders wichtig für die Erzielung aussagekräftiger Ergebnisse ist ein möglichst hoher prozentualer Anteil sichtbarer Punkte für jeden Kanal, damit die Anzahl der interpolierten Werte gering ist. Des weiteren ist ein Mindestmaß an Bewegung notwendig, welches ab etwa 3 cm Streckenabstand zwischen zwei Punkten den Lokalisierungsfehler unter ein Prozent senkt. Die Wiederholungen einzelner Versuchsvarianten sollten durchgeführt werden, ohne die Dioden vom Probanden zu entfernen, um innerhalb der



Variante den Fehler durch Lageveränderung der ausgewählten Körperpunkte auszuschließen. Neben diesen Faktoren werden die absoluten Werte vom Berechnungsalgorithmus beeinflusst, der sowohl die Größe selbst betrifft als auch deren Beeinflussung durch die Art der Interpolation fehlender Messwerte. Je nach Indikator sind die Einflüsse durch System, Versuchsaufbau und Algorithmus verschieden stark. Im Ergebnisteil wird der quantitative Einfluss beispielhaft aufgezeigt.

## 4.4 Analysesoftware

Als Messergebnis der Aufzeichnung von Lichtblitzen der Infrarot-Leuchtdioden liegen Raumkoordinaten vor, welche die Lage der Lichtblitze im Raum beschreiben. Sie werden chronologisch für bis zu acht Messpunkte gespeichert. Aus diesen Daten lassen sich unterschiedliche Indikatoren gewinnen. Die hierfür entwickelte Software gliedert sich in zwei Teilbereiche. Sie ermöglicht quantitative sowie qualitative Interpretationsmöglichkeiten durch eine umfangreiche grafische Darstellung und über die Errechnung von Vergleichsgrößen, die als Indikatoren bezeichnet werden. Von arbeitswissenschaftlichem Interesse sind beispielsweise der Zeitaufwand, der Bewegungsaufwand sowie die Bewegungsgeschwindigkeit, die Art der Bewegung oder ihre räumliche Lage im Verhältnis zum Arbeitsplatz. Die Ermittlung der Raumkoordinaten sowie die Betrachtung der Bewegungslinien allein ermöglichen noch keinerlei objektive Aussagen über die Bewertung von Arbeitsverfahren. Erst über die als Indikatoren bezeichneten Vergleichsparameter können Aussagen getroffen werden.

Im Ergebnisteil werden die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten beispielhaft aufgezeigt. Im Anhang ist eine Dokumentation der mathematischen Grundlagen ausgewählter Funktionen sowie eine Gliederung des gesamten Menüs der Auswertesoftware abgelegt. Die im folgenden aufgezählten Messgrößen sind nur eine Auswahl aus den über die Software realisierten Vergleichsparametern.

#### 4.4.1 Quantitative Messgrößen

Aus den aufgezeichneten dreidimensionalen Raumkoordinaten sollen für eine Bewertung der Bewegung relevante Indikatoren ermittelt werden, um einen objektiven Vergleich unterschiedlicher Bewegungsabläufe zu ermöglichen. Verschiedene Fragestellungen erfordern die Interpretation unterschiedlicher Indikatoren.

Als Messergebnisse liegen die Raumkoordinaten in einer zeitlichen Folge für bis zu acht Messpunkte vor. Aus diesen Daten lassen sich verschiedene Indikatoren bilden. Sie werden in der Gruppe der quantitativen Messgrößen zusammengefasst.

##### 4.4.1.1 Zeit

Der am häufigsten genutzte Wert, der in der Arbeitswissenschaft zum Vergleich von Arbeitsprozessen eingesetzt wird, ist die Zeitdauer. Sie ist als Vergleichsgröße vielfach ausreichend, und sie ist leicht zu ermitteln.

Die Gesamtzeit ist ein grobes Maß für die Beurteilung eines Arbeitsprozesses, weil sie u.a. durch die Bewegungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Die Software errechnet die Gesamtaufnahmezeit automatisch aus der Anzahl der aufgezeichneten Messwerte und der dem System zugrunde liegenden Aufzeichnungsfrequenz.

Durch die Arbeit vom REFA (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.) hat die Arbeitszeitanalyse an Wert gewonnen, indem der Leistungsgrad des arbeitenden Menschen mit einbezogen wird. Über den Leistungsgrad werden personenspezifische Variationen in der Ausführungszeit, die in vielen Faktoren begründet liegen können, nivelliert. So wird die Basis geschaffen, eine von den Fertigkeiten und persönlichen Eigenschaften unabhängige Zeit zu ermitteln, die ein Arbeitsablauf in Anspruch nimmt. Grundlage der Leistungsgradbestimmung ist die Beurteilung des Erscheinungsbildes einer Bewegung.

Die bewegungsanalytisch erfassten Grunddaten ermöglichen über die Indikatorbildung eine dem Leistungsgrad ähnliche Bewegungsbeschreibung.

#### 4.4.1.2 Bewegungssumme

Die Bewegungssumme versteht sich als Summe aller Einzelstrecken zwischen zwei aufgezeichneten Raumkoordinaten. Sie wird für jeden Kanal separat errechnet und stellt die Länge des zurückgelegten Weges der markierten Körperpunkte im Arbeitsprozess dar. Die Bewegungssumme ist die wichtigste Größe, die sich aus der digitalen Bewegungsanalyse errechnen lässt. In Kenntnis dieser Größe lassen sich verschiedene Aufgaben oder Gestaltungsvarianten miteinander vergleichen. Der Umfang der energetischen Arbeit innerhalb der Aufgabe lässt sich abschätzen.

Die Genauigkeit der Werte hängt vom Umfang der notwendigen Interpolation ab, die aufgrund verdeckter Messwerte erfolgen musste und von den Abständen zwischen den Messpunkten (siehe Tabelle 2 und Kapitel 4.3).

#### 4.4.1.3 Bestimmung des Arbeitsbereiches im Raum

Neben der relativen Geschwindigkeit der Bewegungen lässt sich die relative zeitliche Verteilung der Koordinaten in definierten Bereichen darstellen. Dafür wird der gemessene Raum in Quader beliebig auszuwählender Größe unterteilt, die Gesamtaufenthaltsdauer in diesen Quadern errechnet und nach der Häufigkeit ihrer Frequentierung in unterschiedlichen Graustufen dargestellt. Diese Darstellung ist zweidimensional, d. h., man betrachtet entweder von oben oder von vorn. Die Berechnung erfolgt für jeweils einen Messpunkt am Körper.

Um die Lage des erkannten Bereichs mit der Person oder dem Arbeitsmittel in Bezug zu setzen, besteht die Möglichkeit, einen Referenzkanal abzubilden. Die Vergleiche können somit entweder innerhalb der Varianten erfolgen oder aber die verschiedenen Gestaltungsformen charakterisieren. Effiziente und weniger effiziente Arbeitsweisen unterscheiden sich z.B. in der Kompaktheit der aufgezeigten Flächen.

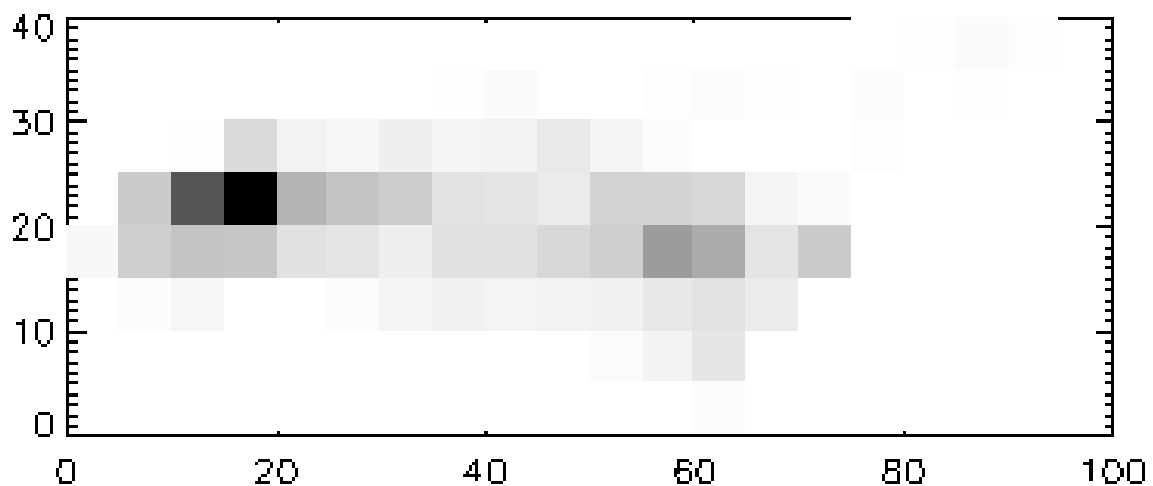


Abb. 5: Darstellung des Arbeitsbereiches der rechten Hand beim Auflegen von Porree auf ein Förderband (je dunkler, desto häufiger frequentierter Bereich)

#### 4.4.1.4 Ermittlung der Länge einzelner Bewegungsabschnitte

Die Aufzeichnung längerer Bewegungssequenzen steigert über eine mögliche statistische Absicherung die Aussagekraft des Gesamtergebnisses. Einzelne Ablaufabschnitte innerhalb der aufgezeichneten Tätigkeit können in ihren Bewegungssummen jedoch nicht mehr voneinander abgegrenzt werden. Das Endergebnis ist die Gesamtsumme aller Bewegungs-Wiederholungen innerhalb einer Aufzeichnung.

Um eine Weglänge zwischen zwei charakteristischen Punkten im Arbeitsprozess (z.B. Aufnehmen und Ablegen eines Gegenstandes) zu quantifizieren, lassen sich über die Software die Bewegungssummen bestimmter Abschnitte errechnen, innerhalb derer eine definierte Richtungsänderung von Punkt zu Punkt nicht überschritten wird. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Bewegung zwischen den definierten Punkten flüssig erfolgt, da sie sonst, gemäß der gewählten Definition von Bewegungen, in mehrere Abschnitte zerlegt wird.

Nach Angabe einer frei wählbaren Länge in cm ermittelt die Softwarefunktion alle Bewegungsabschnitte, die der angegebenen Länge entsprechen oder kürzer sind. Die Bewegungsabschnitte werden mit markierten Anfangs- und Endpunkten grafisch dargestellt (siehe Abbildung 6, oben) oder als Längenmaße in einer Tabelle

aufgelistet und gespeichert. Aus der grafischen Darstellung können die Abschnitte bestimmten Tätigkeiten zugeordnet werden.

Die Streckenlängen, welche die Länge des gesamten Bewegungsabschnittes repräsentieren, sind länger als der direkte Abstand zwischen Anfangs- und Endpunkt, da menschliche Bewegungen nicht geradlinig erfolgen. Eine Bewegung, die in ihrer Länge exakt dem gemessenen Abstand am Arbeitsplatz entspricht, ist ausführbar, jedoch widernatürlich und zeitaufwendiger.

Eine weitere Softwarefunktion ermöglicht die Bestimmung der Scheitelpunkte für die ermittelten Bewegungsabschnitte. Wie beschrieben erfolgen menschliche Bewegungen nicht geradlinig, sondern sie zeigen einen bogenförmigen Verlauf. Der Scheitelpunkt des Bogens wird als der im Bewegungsverlauf am weitesten von der Arbeitsoberfläche entfernte Punkt definiert. Je länger die Strecken sind, desto größer ist der Abstand zur Arbeitsoberfläche. Es können daher nur Bewegungen ähnlicher Längen miteinander verglichen werden.

Der untere Teil der Abbildung 6 zeigt die jeweiligen Scheitelpunkte der Bewegungsabschnitte in chronologischer Abfolge. Der Scheitelpunkt könnte beispielsweise ein Maß für den Übungsgrad darstellen, er kennzeichnet die jeweilige Bewegungseffizienz verschiedener Personen oder arbeitsgestalterische Einflüsse auf die Bewegungen. Bei geübten Personen verlaufen repetitive Abläufe gleichmäßig, die Schwankungen in den Scheitelpunkten wären gering.

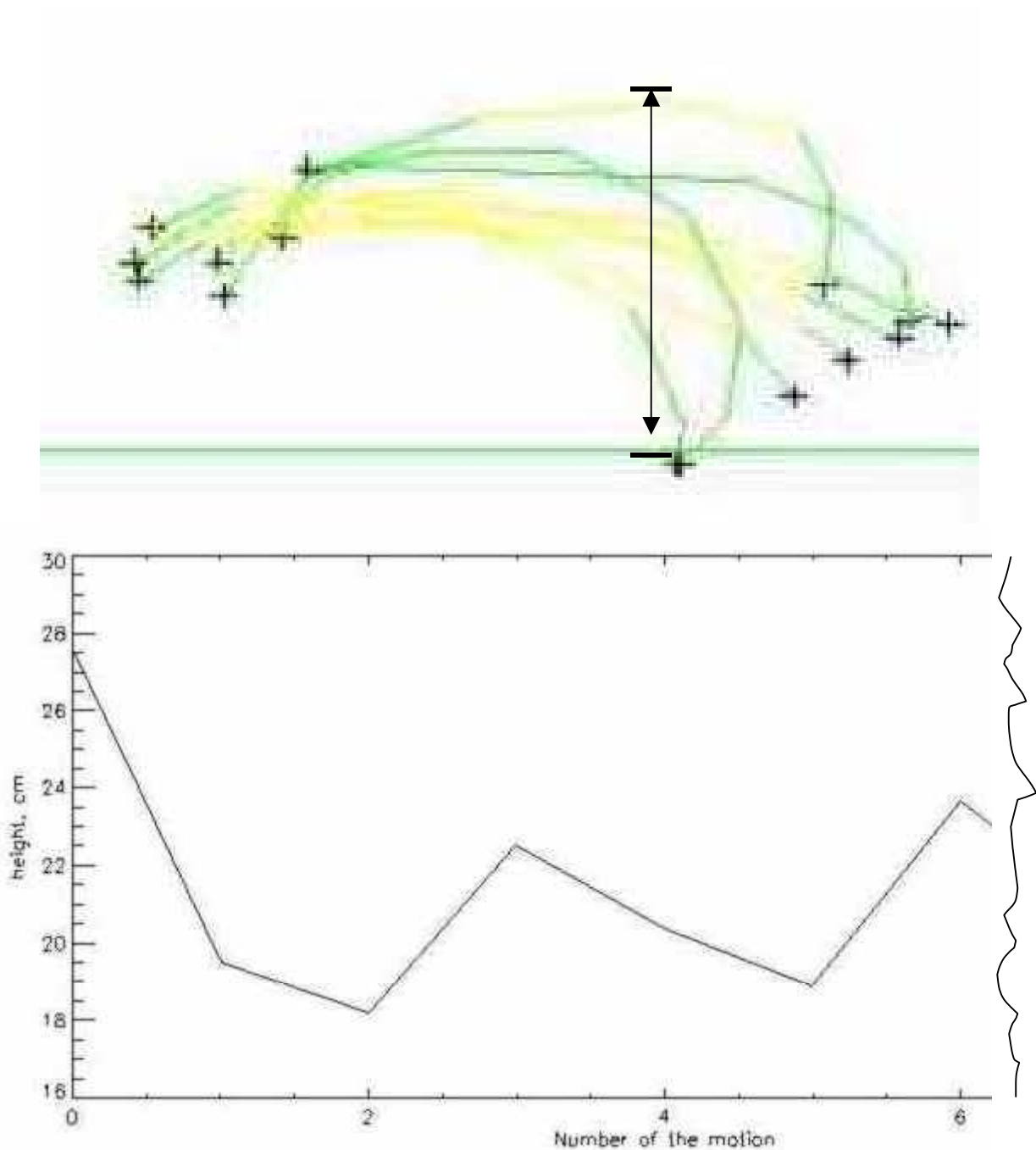


Abb. 6: Darstellung von Einzelbewegungen (oben) und ihre als Scheitelpunkte definierten maximalen Abstände zur Arbeitsoberfläche in cm (unten)

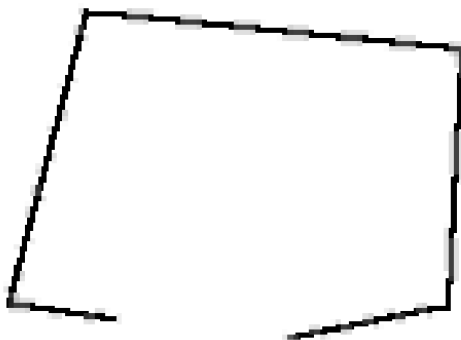
#### 4.4.1.5 Abstand zwischen zwei Punkten verschiedener Kanäle

Über die Software ist es möglich, alle Bewegungen in Echtzeit zu durchlaufen. Zwei oder mehrere zeitlich aufeinanderfolgende Punkte unterschiedlicher Leucht-

dioden können kontinuierlich durch eine Linie miteinander verbunden werden, um beispielsweise die Bewegung des Oberkörpers im Vergleich zu den Beinen oder dem Öffnungswinkel eines Armes darzustellen. Bei geschickter Anbringung der Leuchtdioden am Körper können diese über die Verbindungslinien so dargestellt werden, dass bestimmte Körpersegmente versinnbildlicht werden (Abbildung 7). Die Bewegungen werden dann in diesen Segmenten durchlaufen und können als Videodatei abgespeichert werden.

Neben der bildlichen Darstellung zweier miteinander verbundener Punkte kann die Länge des Abstandes zwischen den Leuchtdioden berechnet und in einer gesonderten Datei gespeichert werden.

Die jeweiligen Abstände werden außerdem als Minimum, Durchschnitt und Maximum in der automatischen Statistikdatei gespeichert und auf dem Bildschirm angegeben. Für quantitative Bewertungen kann der Verlauf der Abstände aus der gesonderten Datei verwertet werden. Aus dieser Funktion ergeben sich sehr vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.



*Bezugsobjekt*

Abb. 7: Sechs Leuchtdioden, durch deren Verbindung die Unterarme, Oberarme und der Schultergürtel schematisch dargestellt werden

Die bildliche Darstellung der miteinander verbundenen Leuchtdioden dient der Bewegungserklärung. Die Berechnung der Abstände zwischen ausgewählten Körperpunkten ermöglicht eine Verwendung als Vergleichsgröße.

Die Verwendung der Messwerte dieses endoskelettären Konzeptes entspricht jedoch nur einem Primitivskelett (Aune & Jürgens 1989), nämlich lediglich einer Annäherung an die realen Gelenksituationen.

#### **4.4.1.6 Entfernung zur Arbeitsoberfläche**

Das Bezugsobjekt (siehe Anhang), das durch Einmessen in einer separaten Messung in Form eines Rechtecks dargestellt wird, ist ein wesentlicher Bezugspunkt für die Bewertung der Arbeitsausführung. Bei der Berechnung der Entfernung zur Arbeitsoberfläche wird der kürzeste Abstand des im Aktionsmodus stehenden Kanals zum Bezugsobjekt für jeden Messpunkt ermittelt und in Form von Längenmaßen in einer Liste gespeichert.

Sehr verschiedene Fragestellungen können die Ermittlung des Abstandes von einem Punkt zum Bezugsobjekt erfordern. Die Abstände können im Verlauf dargestellt werden. Diese Funktion erbringt einen ähnlichen Nutzen wie die unter 4.4.1.4 dargestellte Ermittlung der Scheitelpunkte. Die Berechnung ist jedoch unabhängig von Bewegungsabschnitten, sie ermittelt die Abstände für jeden Punkt in der Bewegungslinie.

#### **4.4.1.7 Anzahl der Bewegungen**

Angeregt durch eine Untersuchung von Datta et. al. (2001) zur Beurteilung der technischen Fertigkeiten von Chirurgen, wurde die Ermittlung von Einzelbewegungen realisiert. Im Gegensatz zur manuellen Ermittlung von Bewegungsabschnitten durch Eingabe von Längen wird hier die Gesamtbewegung automatisch in einzelne Bewegungen unterteilt.

Die gemessene Anzahl der Bewegungen ist davon abhängig, wie die Bewegung definiert wird. In der Literatur ist keine eingeführte Definition für eine Bewegung bekannt. Die Auswertesoftware bietet daher die Möglichkeit, mit zwei unterschiedlichen Definitionen zu arbeiten. Die den Untersuchungen von Datta zugrunde liegende Annahme ist, dass eine Bewegung als beendet gilt, wenn sich die Bewegungsgeschwindigkeit verändert. Eine andere Möglichkeit ist, eine Bewegung als



beendet zu betrachten, wenn sich die Bewegungsrichtung deutlich ändert. Als Bemessungsgrundlage für eine deutliche Richtungsänderung wurde zunächst ein Winkel von  $\geq 45^\circ$  angenommen. Es muss untersucht werden, welche der beiden Definitionen die geeignetere ist und in wieweit die Eignung von der Arbeitsaufgabe abhängt. Im Rahmen von Untersuchungen zum Energieumsatz fanden Grandjean (1991) und Bouisset und Monod (1964) heraus, dass bei Bewegungen von 60 Grad nach rechts (gemessen an der Horizontalen) die elektrische Aktivität der Muskulatur am geringsten ist. Über die beschriebene Funktion ließen sich so Bewegungsabschnitte herausfiltern, deren Energieverbrauch unnötig hoch ist. Die winkelabhängige Bemessungsgrundlage berücksichtigt somit den energetischen Aufwand.

Die Anzahl der benötigten Bewegungen könnte Aufschluss geben über die individuellen Fertigkeiten, die Schwierigkeit der Aufgabe, den Ermüdungszustand oder den Lernerfolg. Sie könnte ein objektives Teilkriterium für die Leistungsgradbeurteilung darstellen.

Die Klärung, welche der genannten Definitionen besser geeignet ist sowie die Validierung des Indikators, ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

#### **4.4.1.8 Winkelfunktionen**

Die Berechnung von Winkeln setzt die durch Verbinden markierter Körperpunkte entstehende Bildung von Strecken (siehe Abbildung 8) voraus, die in ihrem Bezug zueinander durch Winkel beschrieben werden. Für eine Winkelberechnung müssen mindestens zwei Körperpunkte verfolgt werden.

Die Bewegungen der Arme oder Beine lassen sich beispielsweise durch den Gelenköffnungswinkel um Knie oder Elle beschreiben, wofür jeweils die Aufzeichnung dreier Marker notwendig ist. Werden die drei Marker miteinander verbunden, ergeben sich drei Strecken (a, b und c), deren Stellung zueinander wiederum durch Winkel beschrieben wird (Abbildung 8).

Die mathematischen Grundlagen der Winkelberechnung setzen voraus, dass drei Informationen vorhanden sind (Winkelgrößen oder Streckenlängen), um über den Sinus- oder Kosinussatz die fehlende Information zu errechnen:

Sinussatz:  $\frac{a}{b} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$

Kosinussatz:  $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$

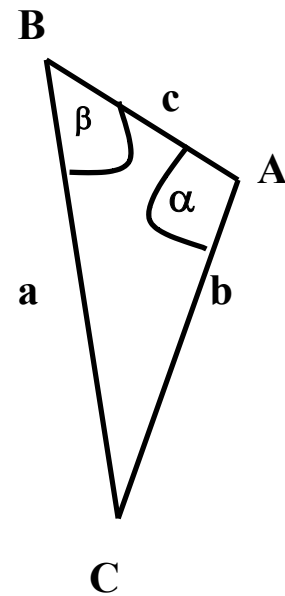
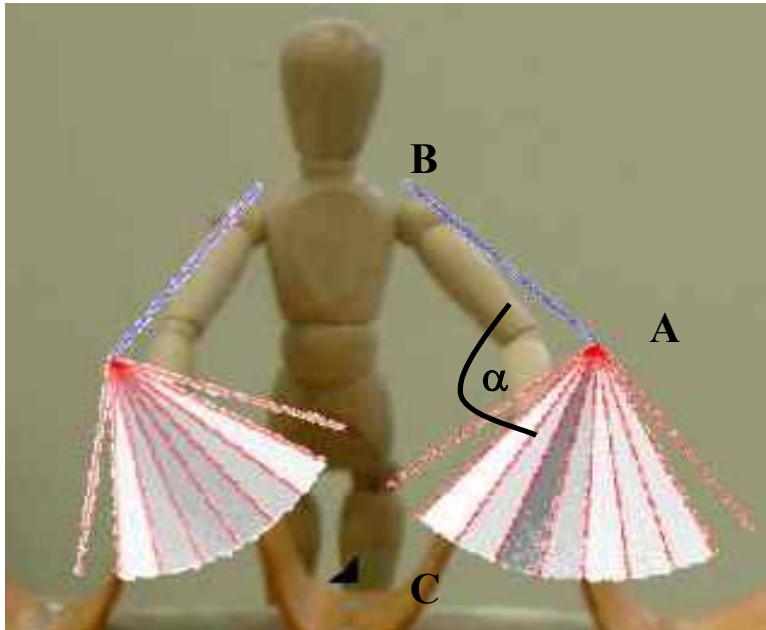


Abb. 8: Berechnung des Gelenköffnungswinkels ( $\alpha$ ) basierend auf den Messpunkten an Schultern (B), Ellen (A) und Händen (C); Grauschattierung spiegelt die Häufigkeit wider (je dunkler, desto häufiger)

Da die Funktion einen Winkel berechnen soll, werden jeweils die Längen der Dreiecksseiten ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) benötigt und der Kosinussatz entsprechend umgeformt.

Der erste Berechnungsalgorithmus für die Winkelgröße basiert auf den jeweils aktuellen Raumkoordinaten in den Punkten A, B und C. Die drei ausgewählten Kanäle bilden ein Dreieck (siehe Abbildung 7), dessen Winkelgröße  $\alpha$  berechnet wird (siehe auch Berechnungsalgorithmen im Anhang).

Die zweite Methode basiert auf der Annahme, dass sich die Grundseiten  $b$  und  $c$  des Dreiecks in ihrer Länge nicht verändern. Für die Berechnung des Winkels  $\alpha$  werden die Längen von  $b$  und  $c$  über die gesamte Messung berechnet und daraus ein Durchschnittswert für beide Grundseiten ermittelt. Anwendungsmöglichkeiten für diese Methode bestehen beispielsweise dann, wenn der Winkel um die Ellenbeuge, beschrieben durch die Teilabschnitte des Ober- und Unterarms, berechnet werden soll.

Bei der dritten Möglichkeit, den Winkel  $\alpha$  zu berechnen, werden die Längen der Grundseiten  $b$  und  $c$  am Probanden gemessen und später manuell eingegeben. Nur noch  $a$  (Strecke zwischen  $B$  und  $C$ ), die dem zu berechnenden Winkel gegenüberliegende Seite, basiert auf Messwerten.

Die Wahl des jeweiligen Berechnungsverfahrens obliegt dem Nutzer und ist u.a. abhängig von der Messgüte der ausgewählten Kanäle. Die Qualität der Messung wird, wie unter 4.3 beschrieben, durch mehrere Faktoren beeinflusst. Auch hier ist die Sichtbarkeit das wichtigste Kriterium. Eine gute Sichtbarkeit reduziert die Notwendigkeit der Interpolation fehlender Werte.

Neben der Berechnung von Winkeln, die auf drei beweglichen Punkten basieren, können die Winkel zu einer in einem Punkt gebildeten Senkrechten berechnet werden. Hierfür werden zwei Kanäle ( $B$ ,  $A$ ) ausgewählt. Vom ersten ausgewählten Kanal wird eine Senkrechte ( $a$ ) gebildet (siehe Abbildung 9). Auf dieser Senkrechten wird ein beliebiger Punkt ( $C$ ) gewählt und für die Berechnung der Dreiecksseite  $a$  verwendet (Abbildung 9).

Als Anwendungsbeispiel wäre das Anheben des Oberarms zu nennen, wobei Punkt  $B$  einen Marker an der Schulter repräsentiert und Punkt  $A$  die Koordinaten des Ellbogens darstellen.

Nach Berechnung erhält der Nutzer zunächst eine grafische Darstellung der berechneten Winkelgrößen und ihrer Häufigkeit (wie Abbildung 8). Die jeweiligen Winkelverläufe lassen sich außerdem in separaten Dateien speichern.

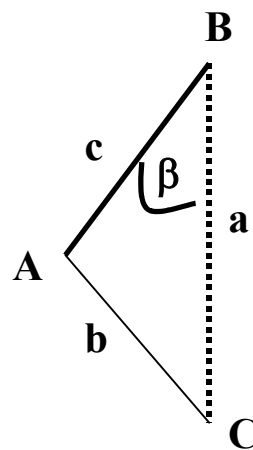


Abb. 9 Berechnung des Armhebungswinkels ( $\beta$ ) basierend auf den Markern an Schulter (B) und Elle (A)

Bei zyklischen Bewegungsabläufen werden bestimmte Phasen durch entsprechende Winkelgrößen charakterisiert. Betrachtet man die gleichzeitige Veränderung zweier Winkel (z.B. Anheben des Oberarmes und dem Öffnungswinkel um die Elle), so kann dieser Verlauf in sogenannten Winkel-Winkel-Diagrammen dargestellt werden. Die Kongruenz solcher Verläufe ist ein Zeichen harmonischer Arbeitsausführung und günstiger Gestaltung. Als Grundlage für die Darstellung der Winkel-Winkel-Diagramme müssen die Winkelverlaufsdateien angelegt werden. Die Betrachtung von kombinierten Winkelverläufen berücksichtigt, dass es sich beim Menschen um einen komplexen Bewegungsapparat handelt, d.h. dass beispielsweise Änderungen beim Bewegungsverlauf der Hand gleichzeitig Änderungen der Ellen- oder Schulterbewegung hervorrufen können.

In Abhängigkeit vom Interpolationsalgorithmus, nämlich der sog. „speed based“ oder „straight approximation“, erhält man sowohl innerhalb einer Berechnungsmethode als auch zwischen den beschriebenen Winkel-Algorithmen eventuell voneinander abweichende Ergebnisse. Dies ist beispielhaft in Abbildung 29 im Ergebnisteil dargestellt.

## **4.4.2 Qualitative Bewertungskriterien**

Neben den aufgeführten Messgrößen, die teilweise grafische Darstellungen beinhalten, gibt es Funktionen mit ausschließlich grafischem Charakter. Sie dienen dem besseren Verständnis der Bewegungen und der übersichtlichen Darstellung von Zusammenhängen. Ihre Interpretation bleibt rein qualitativer Art.

### **4.4.2.1 Räumliche Darstellung der Bewegungslinien**

Gegenüber der im Messcomputer dargestellten, zweidimensionalen Ansicht der Bewegungsspuren ermöglicht die neue Software eine dreidimensionale Ansicht der Bewegungslinien. Dabei können entweder die definierten Ansichten im Menu gewählt oder durch Anklicken und Ziehen des Mauszeigers Ansichten jeder beliebigen Position erzeugt werden. Für die Beurteilung von Bewegungen im Raum bieten sich die voreingestellten Ansichten der Bewegungslinien von vorn („Front“), von oben („From top“) oder die Ansicht von rechts („From right side“) an. Erst der Wechsel in den Ansichten ermöglicht eine vollständige Nutzung der gemessenen dritten Dimension.

### **4.4.2.2 Messkanalweise Darstellung der Bewegungslinien**

Die Bewegungslinien werden einzeln für jeden Kanal abgebildet oder aber alle gemeinsam, wobei jeweils ein Kanal im Auswertungsmodus steht. Für das bessere Verständnis der Lage im Raum wird ein Bezugsobjekt abgebildet, welches durch eine Eichmessung vor jeder Messreihe nach genauen Vorgaben gebildet wird. Diese Vorgaben sind im Programm abgelegt.

Jede Bewegungsmessung kann pro Kanal in ihrer Gesamtheit abgebildet oder unter Vorgabe einer bestimmten Abbildungslänge durchlaufen werden. Eine Bewegung im Track von Punkt zu Punkt ist ebenfalls möglich.

Die Bewegungslinien lassen sich wahlweise als Gesamtbild oder in definierter Länge als Teilstücke darstellen. Durchläuft man den Track, so kann jederzeit gestoppt und schrittweise vor oder zurück gegangen werden. Es können auch alle Kanäle gleichzeitig durchlaufen werden.

#### 4.4.2.3 Visualisierung von Geschwindigkeiten einzelner Bewegungsabschnitte innerhalb des Arbeitsvorganges

Die Bewegungslinien können in unterschiedlichen Farben abhängig nach Geschwindigkeiten dargestellt werden (Abb. 9). Die Farben werden in einem Menüpunkt nach Bedarf vom Nutzer selbst bestimmt. Die Geschwindigkeiten sind in fünf Stufen unterteilt und orientieren sich innerhalb einer Messdatei an der schnellsten und langsamsten Bewegung. Das heißt, für jeden Messzyklus werden alle Farb-abstufungen in vollem Umfang genutzt. Dadurch sind die Geschwindigkeiten zwischen Messungen jedoch nicht vergleichbar.

Für den Vergleich verschiedener Messungen wurde eine Funktion realisiert, welche die Darstellung der absoluten Geschwindigkeiten ermöglicht. Hierzu muss eine Referenzgeschwindigkeit bestimmt werden. Die Farbgebung orientiert sich dann an ihr.

Allen grafischen Funktionen liegen Messwerte zugrunde, aus denen die Indikatoren berechnet werden. Die Grafik dient somit der besseren Visualisierung von Messergebnissen und fördert das Verständnis der auf die Linien reduzierten Bewegungen.

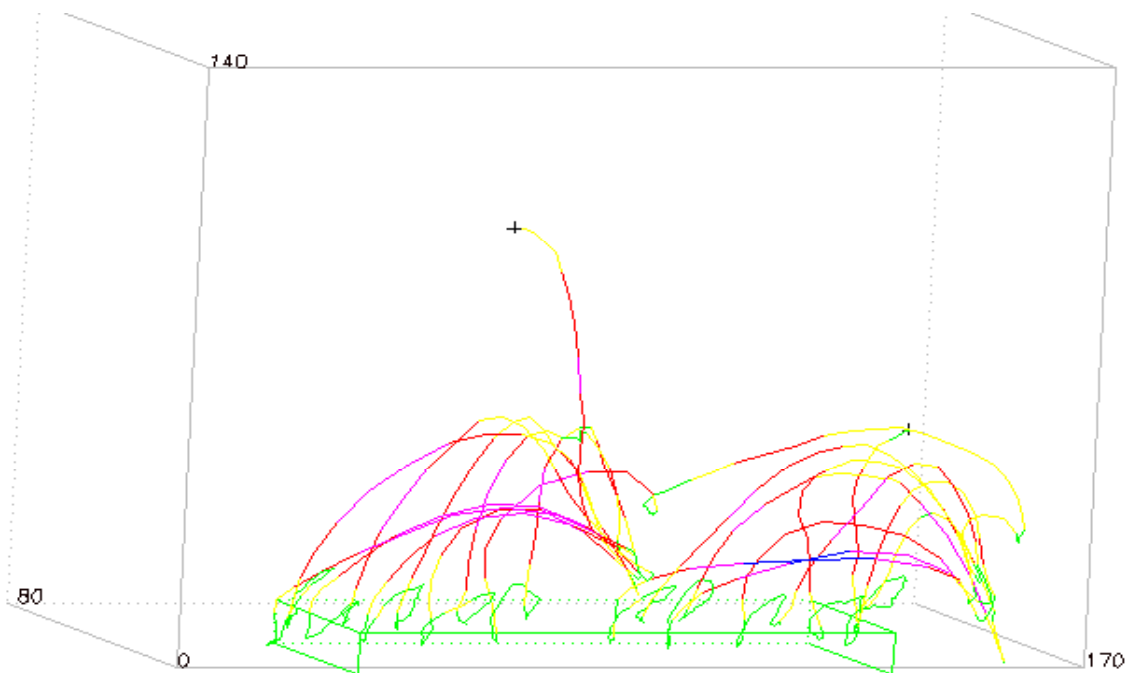


Abb. 10: Räumliche Darstellung der Bewegungslinien der rechten Hand von vorn in geschwindigkeitsabhängiger Färbung

## 5 Ergebnisse

Um die Aussagekraft und den Erkenntnisgewinn aus den softwareseitig ermittelten Indikatoren zu überprüfen und um gleichzeitig neue Anforderungen für die Programmierung zu definieren, wurden Anwendungsversuche mit verschiedenen Fragestellungen durchgeführt, welche grundlegende Probleme der Gestaltung manueller Tätigkeitsbereiche umfassen.

### 5.1 Versuch 1 (Steharbeitsplatz Produkthandling)

In der dargestellten Versuchsreihe geht es vorwiegend darum, den Menschen als Bindeglied zwischen Produkt und Maschine zu betrachten und ihn entsprechend seiner Leistungskapazität und Fertigkeiten optimal einzusetzen.

Viele gartenbauliche Produkte sind durch Inhomogenität und Empfindlichkeit gekennzeichnet. Die Kosten für Mechanisierungslösungen und die technischen Anforderungen steigen dadurch. In Konsequenz verbleiben bestimmte Prozesse in Handarbeit, z. B. die Bereitstellung vieler in Form, Größe und Festigkeit sehr unterschiedlicher Produkte (z.B. Spargel, Porree oder Chicoree) auf Wasch- und/oder Sortierstrecken.

Hohe und stetig steigende Leistungen von optischen Sortieranlagen verlangen eine gut organisierte Bereitstellung der Produkte, um eine möglichst volle Auslastung der Maschinen zu erzielen. Für ein optimales Zusammenwirken muss die Gesamtheit der Wechselwirkungen zwischen dem Menschen und dem Betriebsmittel betrachtet werden.

Variationen in der Gestaltung eines Fließbandarbeitsplatzes (Abbildung 11) sollen die Einflüsse der Anordnung der Produkte, der Bandlaufgeschwindigkeit und der ergonomischen Anpassung des Gerätes an den Menschen auf die erzielten Leistungen und andere zur Verfügung stehende Messparameter verdeutlichen. Ziel ist es aufzuzeigen, dass von den zahlreichen Einflussfaktoren messbare Vor- und Nachteile auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems ausgehen.

### 5.1.1 Material und Methode

Der Versuchsstand besteht aus einem höhenverstellbaren Stahlrahmen mit rundlaufender Auflagefläche, entwickelt für den Schnitt und Transport von Porree zur Wäsche. Das die Produkte transportierende, bewegliche Hartgummiband hat deutliche Vertiefungen, in die jeweils eine Stange einzulegen ist. Die Bandlaufgeschwindigkeit kann über einen, dem Motor vorgeschalteten Frequenzumrichter, geregelt werden. Die Entnahme der Produkte vor der Auflage auf das Förderband erfolgt aus einer Kiste.

Als wiederverwendbares Versuchsgut dienten getrocknete Weidenabschnitte. Bei einmaligem Durchgang (Leeren einer Kiste) werden 91 Weidenabschnitte auf das Transportband gelegt, sie haben eine durchschnittliche Länge von 42.5 cm und ein durchschnittliches Gewicht von 110 g/Stück. Am Ende des Bandes fallen die Produkte wieder in eine Kiste. Bei den sogenannten Dauerversuchen wurden die Weidenabschnitte von einer weiteren Person wieder vom Band genommen und in die Entnahmekiste zurückgelegt, um eine kontinuierliche Produktbereitstellung zu gewährleisten.

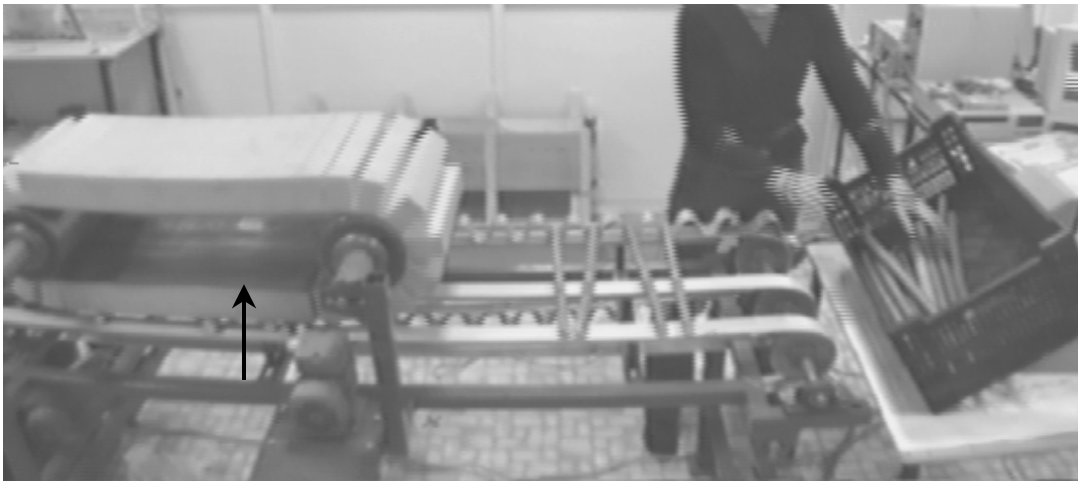


Abb. 11: Steharbeitsplatz bei der Aufbereitung von Porree

Die im Bild sichtbare Polsterfixierung (Pfeil) wurde im Verlauf der Versuche entfernt, um auszuschließen, dass die Sicht der CCD-Kamera auf die rechte Hand im Arbeitsprozess verdeckt wird. Die Arbeitshöhe betrug in der als optimal bezeichneten Variante 90 cm, gemessen am Boden der Vertiefung und 95 cm an der



Schlaufenoberseite. Variationen in der Arbeitsplatzgestaltung erfolgten in der Einstellung der Bandhöhe sowie bei der Aufstellung der Entnahmekiste. Zudem wurden verschiedene Bandlaufgeschwindigkeiten gefahren, die Maschinenkapazitäten von 4500, 6000 und 7300 Stück pro Stunde entsprechen.

Tabelle 3: : **Auflistung der Versuchsvarianten**

	Bandlaufgeschwindigkeit		
	4500 Stangen/h	6000 Stangen/h	7300 Stangen/h
Bandhöhe	niedrig /optimal	optimal	niedrig/optimal
Produkthöhe	Bandhöhe	Bandhöhe	ebenerdig / Bandhöhe

Die Versuche wurden mit vier Probanden, zwei weiblichen und zwei männlichen, durchgeführt. Alle Probanden befanden sich mit ihrer Körpergröße im Bereich des 50. Perzentils, ihr Gesundheitszustand war als gut zu bezeichnen. Die Tätigkeit war eine leichte Arbeit mit normalen Sehanforderungen.

Die empfohlene Arbeitsflächenhöhe liegt hier ca. 15 cm unter der Ellenbogenhöhe. Diese beträgt bei Männern im 50. Perzentil etwa 110 cm und bei Frauen etwa 5 cm weniger (Hettinger & Wobbe 1993). Detaillierte, über diese allgemeinen ergonomischen Überlegungen hinausgehende Hinweise können aus der DIN 33406 entnommen werden. Sie beschreibt die aufgabenabhängige Gestaltung von Arbeitsplatzmaßen im Produktionsbereich. In jedem Fall haben die Arbeitsflächenhöhe und der Arbeitsbereich einen wesentlichen Einfluss auf das körperliche Wohlbefinden der Arbeitskräfte (Studman 1998).

Die Arbeitsaufgabe bestand darin, mit beiden Händen ein möglichst großes Bund Weidenabschnitte aus der Vorratskiste links neben dem Förderband zu greifen und die Abschnitte anschließend einzeln in die vorgesehenen Vertiefungen auf das Förderband zu legen (Abbildung 11). Die Arbeitsaufgabe lässt sich gut in die Vorgänge Greifen, Bringen und Fügen unterteilen. Die Ordnung der Abschnitte innerhalb der Kiste, die Größe der Hände sowie die personenabhängige Fingerfertigkeit sind Einflussfaktoren auf die pro Durchgang gegriffene Anzahl von Weidenabschnitten im Bund. Die Aufgabe erfordert keine besonderen motorischen Fähigkeiten und ist leicht zu erlernen. Die Aufgabe ist stark monoton und repetitiv. Der

Entscheidungs- und Verhaltensspielraum der Arbeitskraft am Fließband ist stark eingegrenzt. Der Arbeitsrhythmus wird durch die Bandlaufgeschwindigkeit vorgegeben. Eine hohe Bandgeschwindigkeit wirkt leistungssteigernd, kann jedoch auch als stressig empfunden werden (Fauß 2003).

Die Produktbereitstellung erfolgte einmal auf Bandhöhe (Abbildung 11) und in einer zweiten Variante durch Absenken der Kiste bis auf 25 cm über dem Boden.

Als informatorisch wertvolle Punkte wurden die Hände, Ellen, Schultern und der Kopf mit Markern versehen. Die Kopfdiode wurde an einem Haarreifen befestigt und mittig kurz hinter dem Haaransatz platziert. Durch den Haarreifen wurde gleichzeitig sichergestellt, dass die Diode von den Haaren nicht verdeckt wird. An den Schultern wurde der äußerste und höchste Punkt am Gelenk für die Befestigung ausgewählt. Als Orientierung für die Befestigung der Diode im Bereich des Ellenbogens diente das proximale Ende der Ulna. Die Dioden auf den Händen wurden jeweils auf den Handwurzelknochen des Mittelfingers befestigt.

### **5.1.2 Ergebnisse**

Von den Probanden werden je nach Dicke der Weidenabschnitte etwa sechs Abschnitte auf einmal gegriffen und in einem Arbeitsgang nacheinander auf das Förderband gelegt.

Die erzielten Leistungen aufgelegter Weidenabschnitte pro Stunde variierten sehr stark. Es wurden durchschnittlich zwischen 3000 und 5500 Stangen/Stunde innerhalb der verschiedenen Varianten aufgelegt (Abbildung 12). Der Durchschnitt aller Varianten betrug 4018 Stangen/Stunde. Parallele Pulsmessungen an den Probanden zeigten, dass die Tätigkeit eine nur geringe körperliche Anstrengung bedeutet, die über die gesamte Zeit im Bereich aerober Sauerstoffversorgung liegt. Die Dauer der Pulsaufzeichnung lag bei einer Stunde, in der keine nennenswerte Zunahme der Pulsfrequenz aufgrund der Tätigkeit zu verzeichnen war. Die absoluten Werte der Pulsfrequenz spiegelten deutlich die körperliche Fitness der einzelnen Probanden wider.

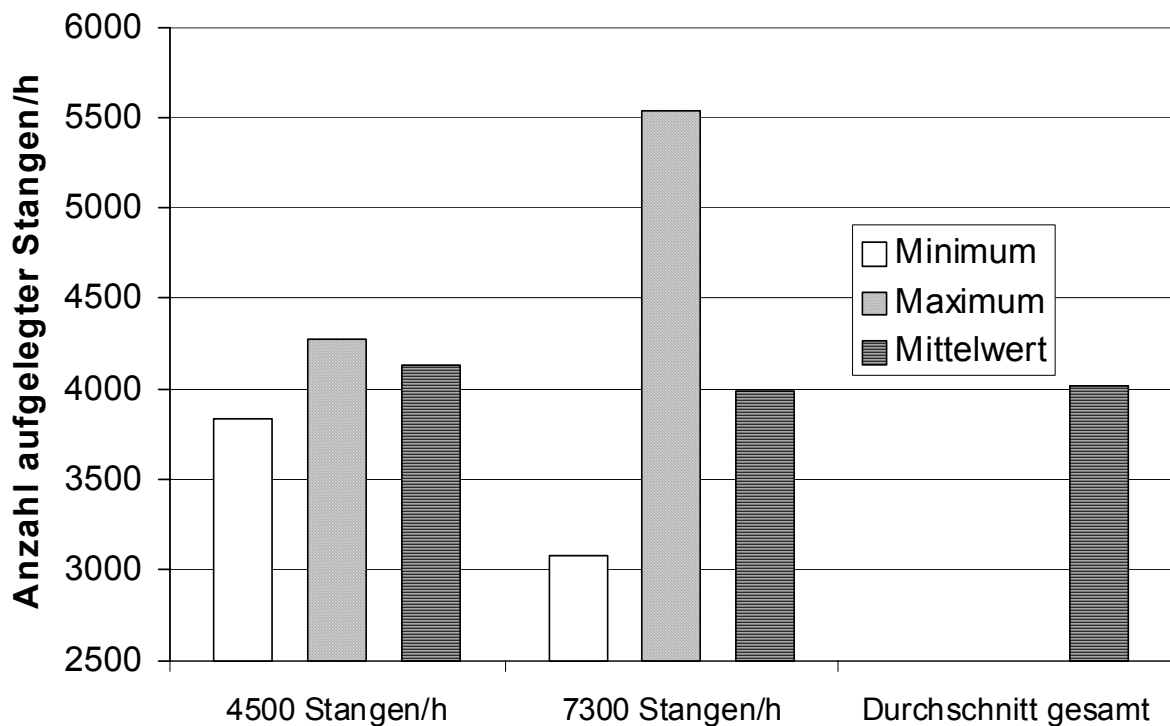


Abb. 12: Streubreite der über die Versuche gemessenen Leistungen aufgelegter Stangen/h in Abhängigkeit von der Maschinenkapazität

Die gemessenen Leistungen zeigen, dass bei niedrigster Maschinenkapazität eine volle Bandbelegung möglich ist. Gemessen an den höchsten erzielten Leistungen von über 5500 Stangen/h könnten am Band sogar Wartezeiten auftreten. Bei der Maschinenkapazität von 7300 Stangen/h entstehen wiederum Lücken auf dem Transportband, weil die Förderleistung deutlich über allen erzielten Leistungen der Arbeitskräfte liegt.

Die höchste Maschinenkapazität zeigt eine sehr große Streubreite der Leistungen auf. Hier wurden sowohl die absoluten Maxima als auch die Leistungsminima erzielt. Der Mittelwert liegt unter dem der niedrigen Maschinenkapazität.

Der personenspezifische Vergleich ergibt für die Person C signifikant höhere Leistungen. In Abbildung 13 sind die jeweiligen Mittelwerte der Probanden in den Versuchsvarianten zu einem Gesamtdurchschnitt zusammengefasst und durch die Standardabweichung in ihrer Variation beschrieben.

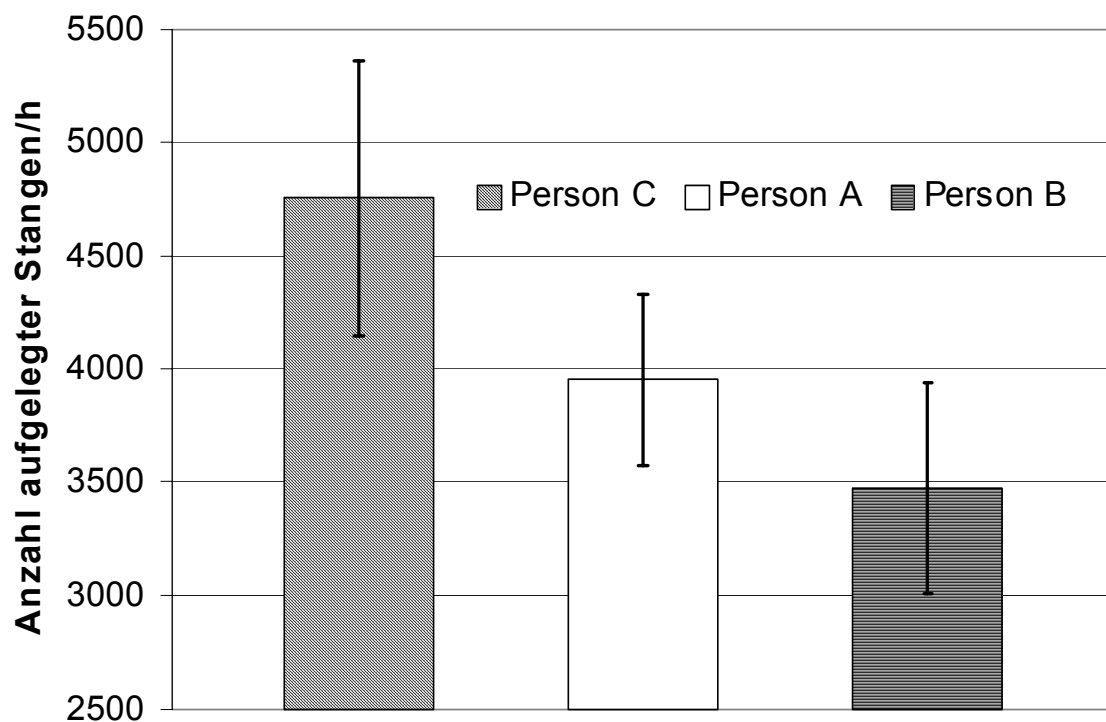


Abb. 13: Personenspezifische Leistungsunterschiede aufgelegter Stangen im Durchschnitt aller Varianten

Die Auswirkungen einer zu niedrigen Arbeitshöhe waren neben den durch die Probanden geäußerten Schmerzen im Rücken- und Nackenbereich in einer Zunahme der Bewegungen quantifizierbar (Abbildung 14). Die gemessenen Bewegungssummen der oberen Extremitäten, die jeweils beidseitig an drei Punkten (Schulter, Elle und Hand) gemessen wurden, reduzierten sich durchgängig bei einer an die Körpergröße angepassten Arbeitshöhe. Der gesamte Bewegungsaufwand der oberen Extremitäten konnte im Vergleich der beiden Varianten um 14% gesenkt werden. Abbildung 14 zeigt den Vergleich beider Arbeitshöhen. Die Achsen 1, 2 und 3 repräsentieren den linken Arm, beginnend an der Schulter, die Achsen 6, 5 und 4 den rechten Arm. Die von den hellgrauen Strecken umschlossene Fläche ist deutlich kleiner, sie stellt den Bewegungsaufwand bei einer optimalen Arbeitshöhe dar.

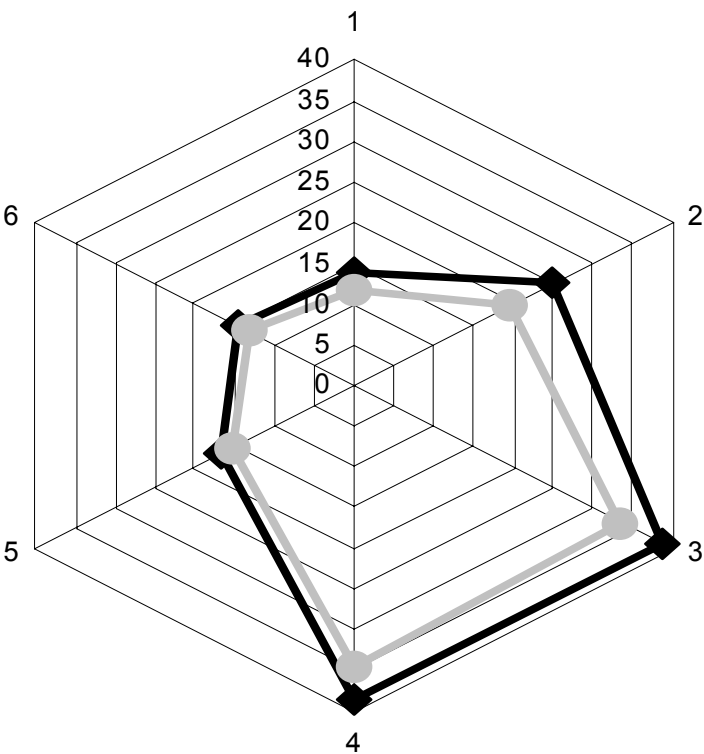


Abb. 14: Bewegungssummen der oberen Extremitäten eines Probanden in m für einen Durchgang (li. Schulter 1, li. Elle 2, li. Hand 3, re. Hand 4, re. Elle 5, re. Schulter 6) bei niedriger Bandhöhe (schwarz) und optimaler Bandhöhe (hellgrau)

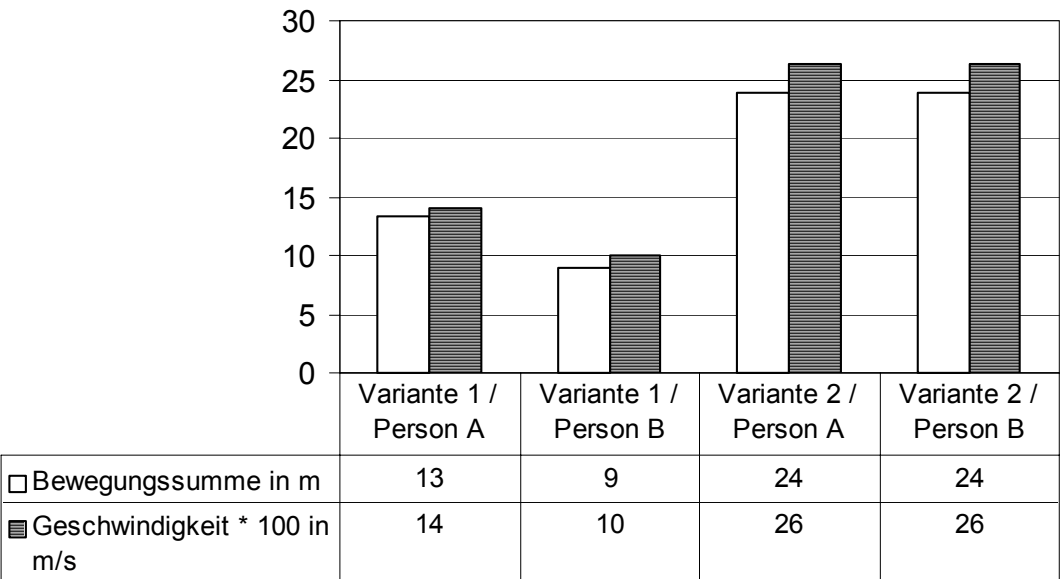


Abb. 15: Kopfbewegung und durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Produktbereitstellung, Variante 1: Kiste auf Bandhöhe, Variante 2: Kiste nahezu ebenerdig

In einer weiteren Versuchsvariante wurde die Anordnung der Produktbereitstellung verändert. Die Vorratskisten wurden für die Entnahme von der Bandhöhe auf ein Niveau von 25 cm über dem Boden abgesenkt, so dass sich die Arbeitskraft zum Produkt herunterbeugen musste. Bei der nahezu ebenerdigen Entnahme der Produkte verdreifachte sich bei Person B die gemessene Kopfbewegung. Auch Person A zeigte einen deutlichen Anstieg der Bewegungssumme. Abbildung 15 zeigt den am Kopf gemessenen Bewegungsaufwand. Entsprechend dem gestiegenen Bewegungsaufwand stieg die Bewegungsgeschwindigkeit, während die Ausführungszeit konstant blieb. Daraus folgt, dass die Belastung deutlich zunimmt, insbesondere durch die Art der Bewegung das Heben einer Last durch Drehen und Beugen des Oberkörpers.

Der in Abbildung 16 dargestellte Vergleich der Leistungen bei variierender Produktbereitstellung zeigt keine signifikanten Unterschiede in der Leistung. Eine ungünstige Produktbereitstellung wird innerhalb des Leistungsumfanges von den beiden Probanden kompensiert. Die Durchschnittswerte der ungünstigen Variante lagen bei beiden Personen sogar über denen der günstigen Bereitstellung.

Die dargestellten Leistungen sind der Mittelwert aus 20 Durchgängen von je 1,5 Minuten Dauer. Person A erzielte jeweils höhere Durchschnittsleistungen. Die höheren in Abbildung 15 dargestellten Bewegungssummen wurden somit bei konstanter Leistung über höhere Bewegungsgeschwindigkeiten erreicht.

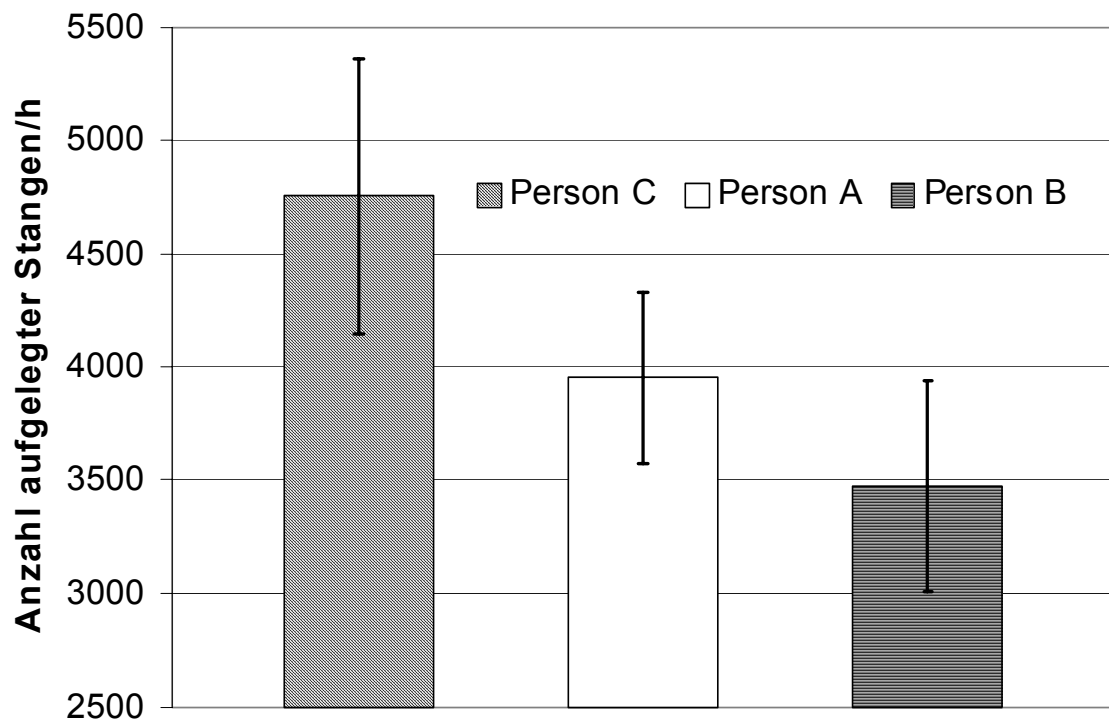


Abb. 16: Aufgelegte Stangen pro Stunde bei zwei Probanden und unterschiedlicher Anordnung der Kisten

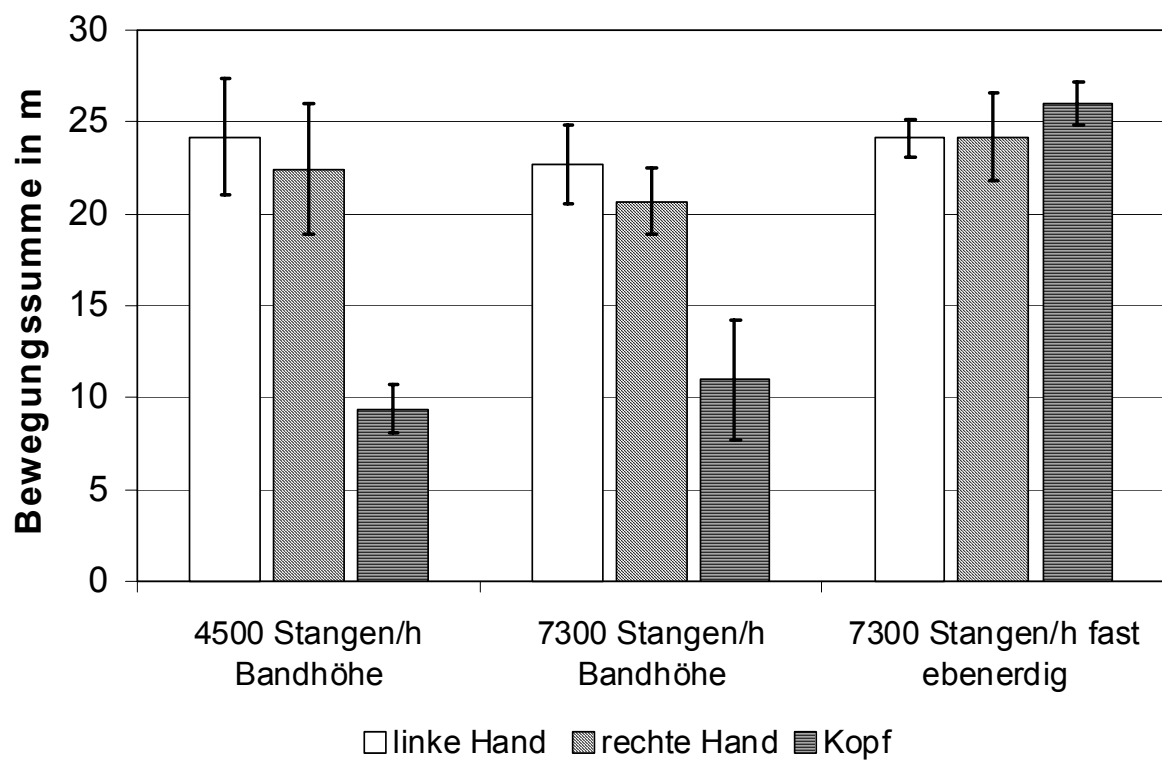


Abb. 17: Bewegungsaufwand von Person C für den Kopf und beide Hände bei unterschiedlicher Bandlaufgeschwindigkeit und Produktbereitstellung

Abbildung 17 zeigt entsprechend Abbildung 15, dass die ungünstige Produktbereitstellung hauptsächlich die Kopfbewegungen beeinflusst. Eine signifikante Veränderung der Handbewegungen ist nicht zu verzeichnen. Der Vergleich der Bewegungssummen bei den verschiedenen Bandgeschwindigkeiten ergibt im Gegensatz zur Produktbereitstellung keine Veränderungen der Bewegungssummen.

Bezüglich des Arbeitsbereiches und der Armwinkel fielen die Versuchsergebnisse bei den verschiedenen Bandgeschwindigkeiten personenspezifisch unterschiedlich aus. Eine Person zeigte mit zunehmender Bandgeschwindigkeit eine Verlagerung des Arbeitsbereiches in Bandrichtung. Je schneller das Band lief, desto weiter entfernte sich der Hauptaufenthaltort der Hände von der Entnahmekiste. Die Greifwege verlängerten sich dadurch, und der Wunsch, das Band komplett zu belegen, wurde immer schwerer zu erfüllen. Entsprechend der Verlagerung des Arbeitsbereiches der Hände wurden bei der Person größere Armwinkel gemessen (Abbildung 18). Die Verschiebung des Auflagebeginns erfolgt aus dem ganzen Arm heraus, nicht allein durch das Öffnen des Armes, sondern gleichzeitig durch ein Anheben (Abbildung 19). Die Standposition der Arbeitskraft blieb unverändert. Die in den beiden Abbildungen dargestellten Winkel verdeutlichen das komplexe Wirken einer Arbeitsaufgabe auf den menschlichen Bewegungsapparat. Werden derartige Zusammenhänge in einer Grafik dargestellt, spricht man von Winkel-Winkel-Diagrammen (Abbildung 20).



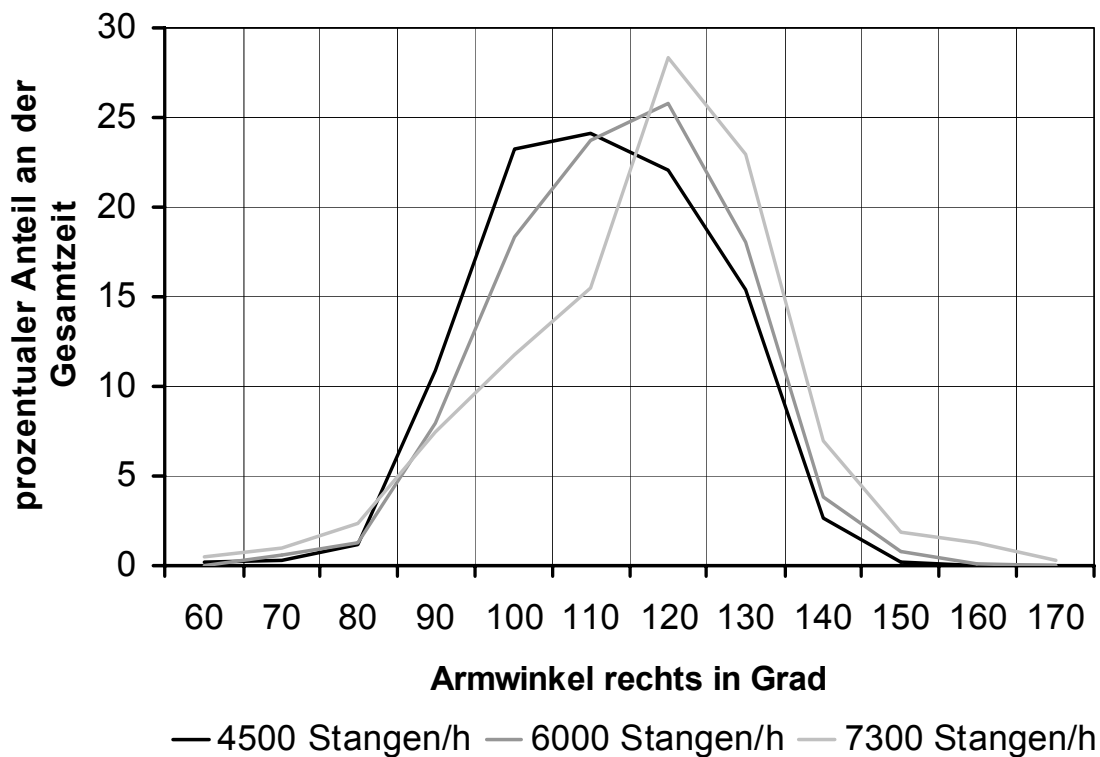


Abb. 18: Öffnung des rechten Armes während der Arbeit in Abhängigkeit von der Bandlaufgeschwindigkeit

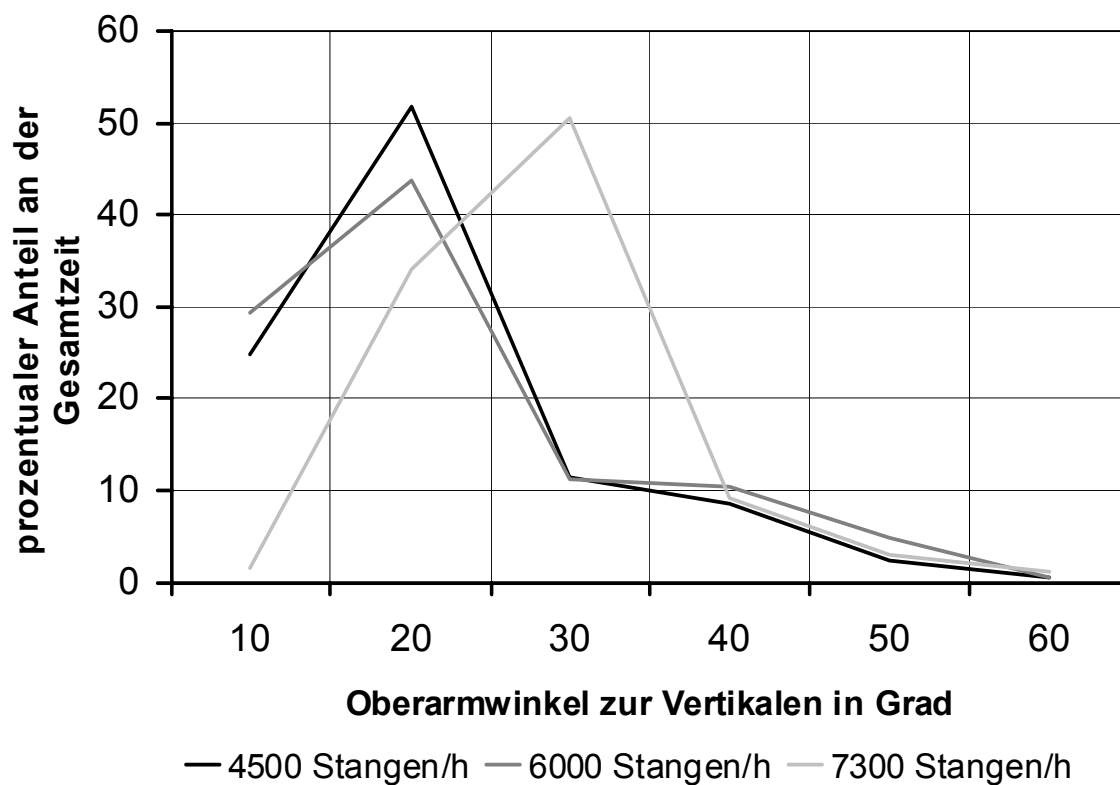


Abb. 19: Anheben des Oberarmes während der Arbeit in Abhängigkeit von der Bandlaufgeschwindigkeit

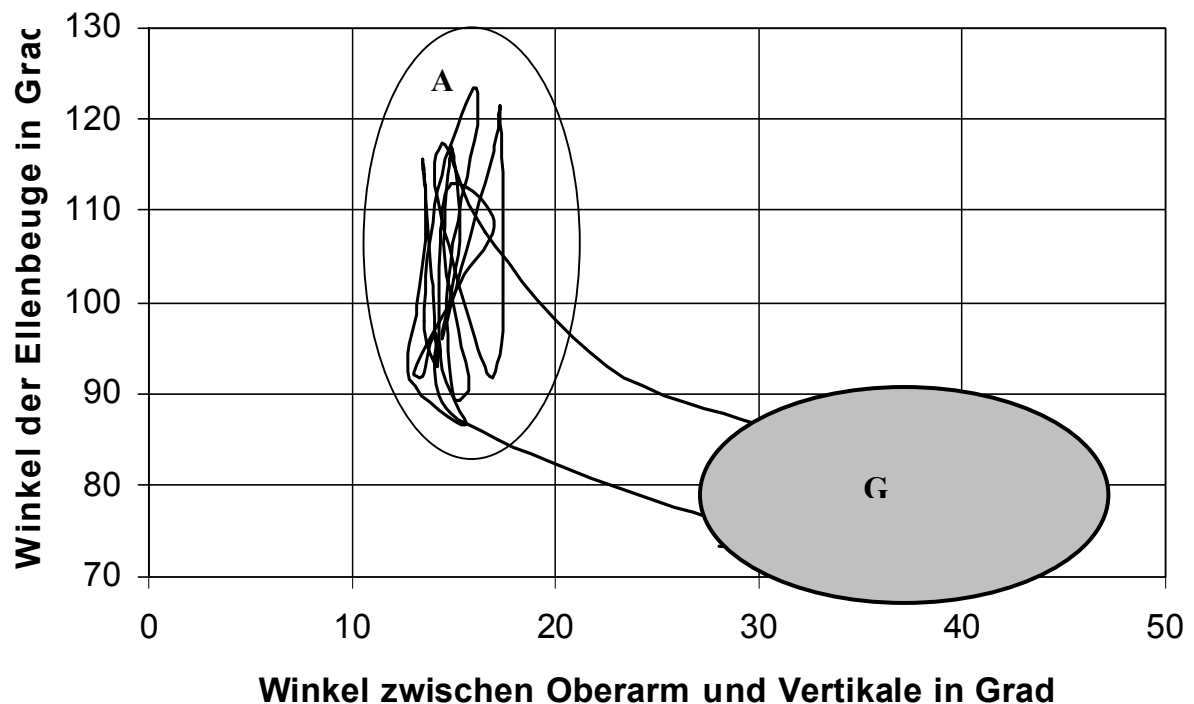


Abb. 20: Winkelverlaufdiagramm des rechten Armes für das Greifen (G) und Ablegen (A) eines gegriffenen Bundes Weidenabschnitte

Das Winkel-Winkel-Diagramm in Abbildung 20 zeigt die Winkelverläufe für einen Arbeitsgang bei Person B, niedriger Bandhöhe und der höchsten Bandlaufgeschwindigkeit. Der Linienverlauf ist hier nicht zu verwechseln mit den aufgezeichneten Bewegungslinien, wo jeder Punkt eine Raumkoordinate abbildet. Das Winkel-Winkel-Diagramm lässt sich in zwei aufgabenspezifische Bereiche gliedern. Das Greifen der Gegenstände erfolgt durch Anheben des Armes um bis zu  $40^\circ$  zur Horizontalen bei nahezu konstanter Öffnung (Bereich G). Die Überlagerung der Winkelgrößen im Bereich der Produktablage auf das Förderband (A) zeigt, dass diese Bewegung aus dem Unterarm heraus erfolgt. Im dargestellten Fall erfolgt das Ablegen gleichmäßig mit nur geringem Anheben des Armes. Ein Verschieben des Arbeitsbereiches wird in diesem Fall nicht beobachtet. Die Betrachtung solcher Bewegungszusammenhänge trägt der Komplexität menschlicher Bewegungen Rechnung, ist aber dennoch nur ein kleiner Ausschnitt des für Koordination und Bewegung notwendigen Aufwandes. Winkel-Winkel-Diagramme erfordern vom Betrachter ein sehr großes Abstraktionsvermögen, sie zeigen jedoch auf der anderen Seite sehr deutlich kritische Bereiche in der Aufgabenstellung. Die im

Diagramm dargestellte Aufgabe zeigt bezüglich der Winkelverläufe keine besonderen Belastungen. Die Bewegungen erfolgen in unkritischen Bereichen.

### 5.1.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Versuche am Fließband belegen die Quantifizierbarkeit der Einflüsse unterschiedlicher Gestaltungsparameter und ermöglichen eine objektive Entscheidungsfindung. Die Variationen in den Messergebnissen verdeutlichen die Komplexität der menschlichen Bewegung und die vielfältigen, aufgabenspezifischen Einflussfaktoren. Trotz der einfachen Arbeitsaufgabe können die z.T. offensichtlichen Gestaltungsmängel über die ausgewählten Einflussgrößen nur teilweise statistisch abgesichert werden.

Die Gestaltung einer leistungsstarken Aufbereitungstechnik, der eine manuelle Auflage vorgeordnet ist, muss demnach gut geplant werden. Nicht die Maschine, sondern der Mensch ist der leistungsbeeinflussende Faktor in derartigen Systemen. Die Organisation im der Maschine vorgelagerten Bereich beeinflusst die Höhe der erzielten Gesamtleistung ebenso wie die individuelle Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft. Kurze Greifwege, ergonomische Gestaltung und eine gleichmäßige Anordnung im Gebinde beschleunigen die Auflage und gewährleisten eine kontinuierliche Ausführbarkeit sowie eine Konstanz in der erbrachten Leistung. Die Bandlaufgeschwindigkeit muss den Produkten sowie der Anzahl an Arbeitskräften angepasst werden.

Besonders auffällig waren die großen Schwankungen in den erbrachten Leistungen, die in Abbildung 11 dargestellt sind. Sie belegen ein vorhandenes Leistungspotential. Über die Steigerung der Maschinenkapazität können bei 7300 Stangen/h nahezu doppelt so viele Stangen befördert wie aufgelegt werden. Die hohen Leistungen, die hier gemessen wurden, zeigen den Motivationseffekt, der aus einem dauernd lückenhaften Band resultieren kann. Die Leistungsschwankungen innerhalb dieser Variante sind jedoch negativ zu werten. Die ständige Überforderung kann psychische Belastungen verursachen.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den untersuchten Aufgaben um monotone und in der Regel schlecht bezahlte Arbeiten handelt, die in ihrer Art selbst einen Einfluss auf die individuelle Leistungsbereitschaft ausüben. Zusätzliche Nachteile durch Gestaltungsmängel müssen entdeckt und minimiert werden. Die festgestellte Kompensation von Gestaltungsmängeln über die Bewegungsgeschwindigkeit ist stark von der individuellen Leistungsbereitschaft abhängig. Die in den Versuchen erbrachten Leistungen sind nicht uneingeschränkt in die Praxis übertragbar, da die Motivationen der Probanden und der Angestellten in Gartenbaubetrieben sehr verschieden sein können. Die Probanden waren sehr bemüht, beste Leistungen zu erbringen. In der Praxis erfolgt die Motivation in der Regel über die Bezahlung.

Die Untersuchungszeiträume waren zu kurz, um eine arbeitsbedingte Ermüdung aufzuzeigen. Die in den Abbildungen 15-17 dargestellten Kopfbewegungen und erbrachten Leistungen repräsentieren, bezogen auf einen gesamten Arbeitstag, sehr kurze Zeiträume. Ob die hohen erbrachten Leistungen und die Kompensation der Gestaltungsmängel über einen gesamten Arbeitstag beibehalten werden, ist fraglich.

Das Ausmaß der Kopfbewegungen ist abhängig von der Aufgabenausführung und der Arbeitsplatzgestaltung. Sie kann als Indikator für das Ausmaß der aufgabenspezifischen Oberkörperbewegung dienen und als Belastungsindex verwandt werden.

Die Haupttätigkeit beim Auflegen der Produkte auf das Förderband verrichten die Hände. Die simultane Aufzeichnung der Ellen und Schultern soll Aufschluss über die Haltung der Arme geben. Wichtig für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die Bewertung der gemessenen Winkel ist der Hinweis, dass die exakten Befestigungspunkte der Marker am Körper nicht markiert wurden, da die Versuchspersonen bekleidet arbeiteten und die Marker auf der Kleidung befestigt wurden. Eine gewisse Ungenauigkeit in der Verfolgung der Körperteile und ein zusätzliches Verrutschen der Kleidung müssen daher in Kauf genommen werden. Die Wiederholungen innerhalb der einzelnen Varianten erfolgten in einem Durchgang, um die Lage der Dioden nicht zu verändern.

Als wesentlicher Indikator für den Vergleich von zwei Gestaltungsvarianten dient im Rahmen der Bewegungsanalyse die Bewegungssumme, d.h. die Summe aller Teilstrecken zwischen den Messpunkten. Dieses Maß wurde schon in den alten motografischen Messungen über Langzeitbelichtungen durch Mitfotografieren von Rastern als Vergleich verwendet (Baum 1983). Die Genauigkeit ist im Rahmen der digitalen Messungen wesentlich größer, was die Berechnung der Teilstrecken aus den dreidimensionalen Raumkoordinaten und die Unabhängigkeit der Messung von sich überlagernden Bewegungen betrifft. Da es sich bei den untersuchten Aufgaben um Greifen, Bringen und Fügen handelt, ist die Bewegung der Hände von zentralem Interesse. Die Verfolgung der Kopfbewegung hat sich in den Versuchen als aufschlussreich dargestellt, vorausgesetzt die Bewegungen bieten ein Mindestmass an Dynamik. Insbesondere bei der durch die Produktbereitstellung induzierten stark gebeugten Tätigkeit werden vom Kopf weite Wege zurückgelegt (siehe Abbildung 15).

In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich ein verlängerter Greifweg in der benötigten Zeit bzw. in der erbrachten Leistung nicht negativ niedergeschlagen hat (Abbildung 16), die Bewegungssummen waren jedoch deutlich höher (Abbildung 15). Daraus resultiert eine stärkere Beanspruchung der Arbeitskraft. Insbesondere die Kopfbewegung nahm deutlich zu, was durch die nun notwendige Rumpfbeugung zu den Produkten erklärt wird. Laut prEN 1005-4:2002 ist ein solches Rumpfbeugen mit einer Frequenz von  $\geq 2$  / Minute nicht akzeptabel. Dasselbe Ergebnis ergibt sich nach einer Beurteilung der Arbeitsbedingungen mit Hilfe von Leitmerkmalen oder anderen Expertensystemen (Mattila 1992). Das Erkennen dieses Gestaltungsmangels ist eigentlich offensichtlich und ohne Messtechnik möglich, dennoch sind derartige Beispiele in Praxisbetrieben zu finden. Der technische Aufwand, um die Greifwege zu verkürzen und das kritische Heben von Lasten aus dem Oberkörper heraus zu vermeiden, ist im Vergleich zu der nachfolgenden Wasch- und/oder Sortiertechnik gering. Besonders nachteilig sind kombinierte Oberkörperdreh- und Oberkörperbeugebewegungen für die Wirbelsäule (Garg 1988; Hettinger 1991, Steinberg 1995). Auf die Vermeidung ist besonders zu achten. Ebenfalls zu vermeiden sind übermäßige Hebegeschwindigkeiten (Bush-Joseph 1988).

Gestaltungsmängel können Schmerzen verursachen und über längere Zeit zu Arbeitsausfällen führen, außerdem sind sinkende Leistungen zu erwarten. Basierend auf einer Stundenleistung von 4000 Stangen bewegt die Arbeitskraft bei einem 8-Stunden-Tag rund 32000 Stück, was ein Gesamtgewicht von rund 3,2 t ergibt. Ob diese Masse 50 cm oder 100 cm weit bewegt wird, hat einen wesentlichen Einfluss auf die aus der Aufgabe resultierende Belastung (Huang 1988). Eine Berücksichtigung der unter Last auftretenden Körperhaltungen ist ein die Stabilität des Systems charakterisierender Parameter. Allgemeines Gestaltungsziel bei der Konzeption von M-M-Systemen muss sein, eine optimale Systemwirksamkeit zu erzielen (Schmidtke 2002).

Die Bewegungsanalyse am Fließband zeigt, dass die Überwachung der Aufgabenausführung sehr wichtig ist. Eine Testperson zeigte mit zunehmender Bandlaufgeschwindigkeit eine Verlagerung des Arbeitsbereiches in Bandlaufrichtung (Abbildung 18 und 19). Dadurch verlängern sich die Greifwege unnötig. Diese personenabhängigen Unterschiede unterstreichen, dass das vorhandene Leistungspotential unterschiedlich genutzt wird und durch Schulung gesteigert werden kann. Gleichzeitig lässt sich hier ein möglicher Grund für die festgestellten Leistungsschwankungen bei hoher Maschinenkapazität manifestieren. Eine regelmäßige Kontrolle der Arbeitsausführung zur Leistungserhaltung erscheint somit ratsam. Wenn sich durch Verlagerung des Auflagebeginns Hin- und Rückweg zum letzten freien Platz kontinuierlich verlängern, könnte das auf die Motivation wirken. Neben dem Empfinden von Stress durch das schnell laufende Band und einer schwer erfüllbaren Zielvorstellung, wird jedoch vor allem unnötige Arbeit verrichtet. Durch Schulung und Kontrollen sind solche Fehler zu vermeiden. Über die Visualisierung der eigenen Arbeitsweise können der Arbeitskraft Probleme leicht verdeutlicht werden.

Ein weiterer Grund in der Verlagerung des Arbeitsbereiches könnte in einer für den geforderten Fügeprozess zu hohen Bandgeschwindigkeit liegen. Je kleiner das Fach für die Produktablage ist, desto schwieriger wird der Arbeitsprozess und die benötigte Zeit steigt an. Da es sich um sehr kurze Zeiträume handelt, sind Zeitmessungen kaum möglich. Um ein Mitlaufen der Hand zu vermeiden, muss die Verweildauer des Bandes im optimalen Arbeitsbereich mit der Dauer des Fügeprozesses abgestimmt werden.

Weder eine Bandhöhe noch eine Bandlaufgeschwindigkeit, die jeden Mitarbeiter optimal berücksichtigt, sind realisierbar, sobald mehr als eine Person am Band arbeitet. Da dies mit den stetig steigenden Maschinenkapazitäten der Fall ist, müssen immer Kompromisse gefunden werden. Die Bandhöhe ist meistens nicht variabel, so dass die Optimierung der Bandhöhe durch Wahl geeigneter Nutzer, den Einsatz homogener Gruppen oder für den Einzelnen über die Veränderung des Bodenniveaus erfolgen kann (Burkhardt 1979). Die von der Bandgeschwindigkeit ausgehende Belastung wird von ungeübten, ungeschickten oder älteren Mitarbeitern höher bewertet werden. Die Leistungen innerhalb einer Gruppe sollten homogen sein.

Die Bewegungsanalyse ermöglicht im Falle der Fließbandarbeitsplätze eine sehr genaue Untersuchung auftretender Bewegungsaufwände, -muster und Körperhaltungen. Eine Gestaltung entsprechend den spezifischen Eigenschaften des Menschen ermöglicht die Reduzierung der Belastung und Beanspruchung und kann dadurch höhere Leistungen ermöglichen und ihre Kontinuität sicherstellen.

Harmonische Bewegungen sind in der Regel ein Zeichen der Effizienz. Der sehr große Umfang des in Aufbereitungslinien auftretenden Produkthandlings erfordert Automatismen und somit Bewegungen, die ohne Nachdenken automatisch ausgeführt werden. Der Wirkungsgrad von Bewegungen kann durch eine optimale Geschwindigkeit und durch Übung erhöht werden. Armbewegungen sollen symmetrisch und zeitlich synchron verlaufen. Starke Beschleunigungen sollten vermieden werden. Diese waren insbesondere dort zu beobachten, wo die Produkte vom tiefen Kistenniveau aufgelegt werden mussten (z.B. Abbildung 15). Diese allgemeinen Erkenntnisse lassen sich im Rahmen der Versuche mit Zahlen unterlegen.

Eine Beurteilung der Harmonie ist anhand der Bewegungsbilder möglich. Das in Abbildung 19 dargestellte Winkel-Winkel-Diagramm zeigt beispielsweise einen harmonischen Verlauf der Produktablage, da sich der Winkelverlauf innerhalb der dargestellten Wiederholungen stark überlagert. Die Bewegungsanalyse greift dort lohnenswert ein, wo offensichtliche Gestaltungsmängel beseitigt wurden. Durch die Aufzeichnung der Bewegungen können sehr genaue Unterschiede in der Aufgabenausführung ermittelt werden, Unterschiede, die durch Beobachtung nicht mehr wahrgenommen werden. Die Verschiebung des Arbeitsbereiches in Band-

laufrichtung, die bei der Erhöhung der Bandgeschwindigkeit festgestellt wurde, wäre nur schwer zu erkennen. Die Auswirkungen unnötiger Greifwege hingegen können von großer Relevanz sein. Ein 10 cm weiterer Weg für jedes Produkt ergibt, auf den gesamten Arbeitstag bezogen, sehr große Entfernungen.

Eine durch hohe Bandgeschwindigkeiten steigende psychische Belastung ist über die Bewegungsanalyse nicht quantifizierbar, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Gefahr gegeben ist. Vor allem die zuvor beschriebene Situation einer nicht aufeinander abgestimmten Zeit für das Einlegen eines Produktes in die Ablage und ihr Passieren, lässt das Entstehen von Arbeitsstress vermuten.

Eine Erfassung der Körperwinkel ermöglicht eine Belastungsbewertung. Die im Winkel-Winkel-Diagramm (Abbildung 20) dargestellte Armbewegung befindet sich in einem belastungsarmen Bereich.

Große Armöffnungswinkel bei gleichzeitigem Anheben des Armes stellen erhöhte Anforderungen an das Gleichgewicht und stehen in direktem Zusammenhang mit der gehobenen Last. Die Belastung wäre deutlich höher.

Der dargestellte Versuch hat sich vor allem mit leistungsbeeinflussenden Parametern befasst. Das breite Spektrum der Einsatzmöglichkeit für die Bewegungsanalyse im Gartenbau wird bereits deutlich.



## 5.2 Versuch 2 (Sitzplatz auf Spargelerntehilfen)

Der nachfolgend beschriebene Versuch legt stärkeres Gewicht auf die menschengerechte Arbeitsgestaltung und zeigt weitere Möglichkeiten der Bewertung von Arbeitssystemen mit Hilfe der dreidimensionalen Bewegungsanalyse.

Bleichspargel ist eine der wichtigsten Gemüsekulturen in Deutschland. Der Anbau ist sehr handarbeitsintensiv. Zur Regulierung des Wachstums und zur Reduzierung der Ernteintensität werden die Spargeldämme immer häufiger mit Plastikfolien abgedeckt. Das Auf- und Abdecken der Folien zur Ernte erhöht den Arbeitsaufwand. Die Ernte des Spargels erfolgt vollständig von Hand. Die Arbeitskraft beugt sich, leicht breitbeinig, mit dem Oberkörper so weit nach vorn, bis die Hände den Damm berühren und sticht das im Damm befindliche Ende der Spargelstange mit einem Spargelmesser auf einer Länge von etwa 25 cm ab. Die Spargelstange wird anschließend herausgezogen und in einen Transportbehälter gelegt. Die Lohnkosten stellen einen erheblichen Anteil der Produktionskosten dar. Die Arbeit selbst ist schwere körperliche Arbeit, begründet durch die aufgabenspezifische, ungünstige Körperhaltung bei der Ernte im stark gebeugten Stehen und aufgrund der langen Arbeitszeiten.

Wegen der Zunahme des Folieneinsatzes wurden Spargelerntehilfen entwickelt, die mehrere Arbeitsschritte im Ernteprozess übernehmen. Verschiedene dieser Systeme ermöglichen dem Stecher eine Ernte im Sitzen. Hauptaufgabe der Erntehilfen ist das Folienhandling, das bei den meisten Geräten nach dem gleichen Prinzip erfolgt. Sehr unterschiedlich sind allerdings die technischen Hilfen gestaltet, die bei den Sitzplätzen das Erreichen des weit entfernten Spargels ermöglichen. Von gar keiner Hilfestellung, über eine schmale Oberkörperstütze zum Anlehnen bis hin zum hydraulischen Oberkörper-Gurthaltesystem wurden verschiedene konstruktive Lösungen gefunden. Allen Systemen gleich ist dabei die Sitzposition des Stechers. Er sitzt rechtwinklig zum Damm, so dass die Arbeitsaufgabe direkt vor ihm liegt (siehe Abbildung 21 und 22).

Zwei der konstruktiv einfachen Varianten, die bereits in vielen Betrieben eingesetzt werden, wurden nachgebaut und unter Laborbedingungen bewegungsanalytisch untersucht.

### 5.2.1 Material und Methode

Die beiden ausgewählten Sitzplatzvarianten bieten der Arbeitskraft einmal gepolsterte Knieschalen und einmal eine schmale, gepolsterte Oberkörperstütze, im Folgenden als Knauf bezeichnet. Das originale Aussehen der in der Praxis eingesetzten Geräte ist in den Abbildungen 21 und 22 zu sehen.



Abb. 21: Sitzkonstruktionen: Kniesitz Praxis (links), Labor (Mitte) und Oberkörperstütze Labor (rechts)

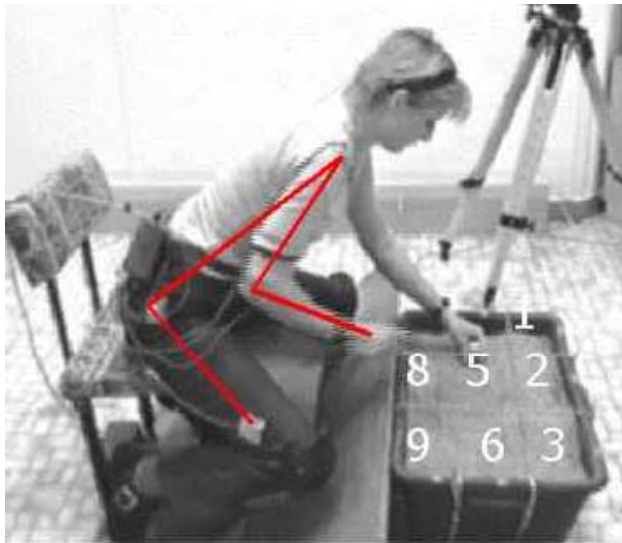


Abb. 22: Sitzplätze im Arbeitsprozess, Kniesitz in der Praxis (links), im Labor (Mitte) und Oberkörperstütze Praxis (rechts)

In den Laborversuchen wird der Spargeldamm durch eine mit Roggen befüllte Mörtelwanne simuliert, um den Ernteprozess möglichst realitätsnah und in ausreichender Wiederholung durchzuführen. Die Verwendung von Roggen verhindert ein Verdichten des Substrates im Versuchsverlauf. Die Mörtelwanne ist in neun Felder unterteilt (Abbildung 23), die im Versuchsablauf für jeden Arbeitsgang als definierter Ernteort dienen und der Arbeitskraft in zufällig bestimmter Reihenfolge

über ein Diktiergerät vorgegeben werden. Entsprechend der Trapezform eines echten Spargeldamms wurde die Mörtelwanne durch ein Brett nach unten hin künstlich verbreitert (siehe Abbildung 21 und 22). Die Breite der Wanne beträgt oben 45 cm und der Abstand der Oberkante vom Boden 36 cm. Die Arbeitsaufgabe des Stechens ist im vorgegebenen Feld folgendermaßen auszuführen: die linke Hand taucht gestreckt in den Roggen ein (entspricht dem einmaligen Aufgraben), die rechte Hand steckt anschließend einen Plastikstab in das Substrat (entspricht dem Stechvorgang mit dem Messer) und die linke Hand zieht den Stab wieder heraus (Herausziehen des Spargels). Bei der Knievariante wird das Ablegen des Spargels vor dem Körper simuliert (Berühren einer gespannten Schnur), bei der Knaufvariante wird der Spargel links neben dem Körper abgelegt. Der Ablageort entspricht somit den auf den Praxisgeräten vorgegebenen Lösungen. Nach jedem Stechvorgang erfolgt die Simulation der Ablage, anschließend besteht eine kurze Pause, in der sich die Arbeitskraft in die Ausgangsposition begibt und den nächsten Befehl abwartet. Mittels Zeitstudien wurde die vorgegebene Zeitspanne zwischen zwei Ansagen entsprechend mittlerer Ernteleistungen für eine Stange Spargel in der Praxis gewählt.

Es erfolgten bewegungsanalytische Aufzeichnungen aus drei Ansichten, von vorne, von links und von rechts, wobei als markierte Punkte die Hände, die Ellen und Schultern sowie Knie, Hüfte und Kopf verwendet wurden. In einem Versuchsdurchgang wurden simulativ 50 Stangen Spargel gestochen, entsprechend der in der Arbeitsaufgabe dargestellten Vorgehensweise, wobei die Reihenfolge der ausgewählten Felder anhand einer Zufallszahlenliste vorgegeben war. Es wurden im Wechsel zwei Zufallszahlenlisten verwendet, damit im Versuchsverlauf kein Lerneffekt auftritt. Der mittlere Dammbereich entspricht den Feldern 4-6, er wurde doppelt so häufig vorgegeben wie der vordere und hintere Bereich. Es wurden jeweils vier Durchgänge gemessen. Die Ergebnisse basieren also auf jeweils 200 Stangen gestochenem Spargel für jede Blickrichtung. Anschließend wurden noch Einzelfeldmessungen durchgeführt, d.h. pro Feld wurde der Bewegungsablauf des Stechens je einer Stange aufgezeichnet.



1	2	3
4	5	6
7	8	9

X

Abb. 23: Anordnung der Felder in der Mörtelwanne, X ist der Standort des Probanden (untere Abbildung); Kniesitz im Labor mit Felderbezeichnung in der Mörtelwanne und gekennzeichneten Dioden (obere Abbildung)

Die benötigte Gesamtzeit für die Messungen ist gleich, da das Tempo durch Ansage des zu stechenden Feldes vorgegeben war. Signifikante Unterschiede zwischen dem Stechvorgang und der anschließenden Pause wurden bei den verschiedenen Probanden über parallel durchgeführte Zeitstudien nicht festgestellt. Zudem ist aufgrund der vollständigen Simulation der Arbeitsaufgabe nicht nachzuprüfen, ob gemessene Unterschiede durch ungenaue Arbeitsausführung oder schnelleres oder erleichtertes Arbeiten auftraten.

### 5.2.2 Ergebnisse

Der Vergleich der Messungen über die Bewegungssummen ergibt folgende Unterschiede: Die Bewegungsintensität ist stark abhängig von der Lage des verfolgten Punktes am Körper. Die Hände sind, als die arbeitsausführenden Organe, die bewegungsintensivsten Körperpunkte. Die ausgezeichnete Beweglichkeit der Hände ist jedoch Ursache häufiger Sichtbarkeitsausfälle.

Die Betrachtung der Einzelfeldmessungen, in denen jeweils für jedes Feld nur ein Stechvorgang aufgezeichnet wurde, erbrachte für die beiden Sitzvarianten bezüglich der Bewegungssummen der Hände keine signifikanten Unterschiede. Erwartungsgemäß steigt die Bewegungssumme mit zunehmender Entfernung des Erntebereichs von der Sitzposition auf beiden Sitzvarianten. Der Bewegungsaufwand für die Felder 1-3 ist größer als der für die Felder 4-6. Für die Felder 7-9 wird die geringste Bewegungssumme gemessen.

Bei der Betrachtung der Mittelwerte aus den Durchgängen mit 50 simulierten Stechvorgängen ergaben sich signifikante Unterschiede. Auf dem Sitzplatz mit der Oberkörperstütze waren die Greifwege deutlich länger. Abbildung 24 zeigt die Bewegungssummen der rechten Hand bei zwei Probanden für beide Sitzplätze. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung liegen die Bewegungssummen für den Kniesitz bei beiden Probanden unter denen, die beim Sitzplatz mit Knauf aufgezeichnet wurden. Die Vergleichswerte basieren auf der Kameraaufzeichnung von rechts und dem Interpolationsmodus der direkten Verbindung zweier Punkte, der jeweils niedrigere Gesamtwerte ergibt, als die geschwindigkeitsabhängige Interpolation. Die Streuung der Werte aus den vier Durchgängen ist mit Standardabweichungen zwischen 3 und 0,7 als niedrig zu bezeichnen.

Auf dem Kniesitz legt die rechte Hand der Person N deutlich weitere Wege zurück als die von Person K. Die Mittelwerte der Bewegungssummen unterscheiden sich um 7 m bezogen auf 50 Stangen. Bei der Oberkörperstütze reduziert sich der Unterschied zwischen den Personen auf 4 m.

Die vier Durchgänge spiegeln insgesamt, übertragen auf die Praxis, eine tatsächliche Erntezeit von einer knappen halben Stunde wider. Inwieweit die längeren

Greifwege eventuell durch die unterschiedliche Ablage des Spargels bei den beiden Geräten verursacht werden, lässt sich nicht überprüfen.

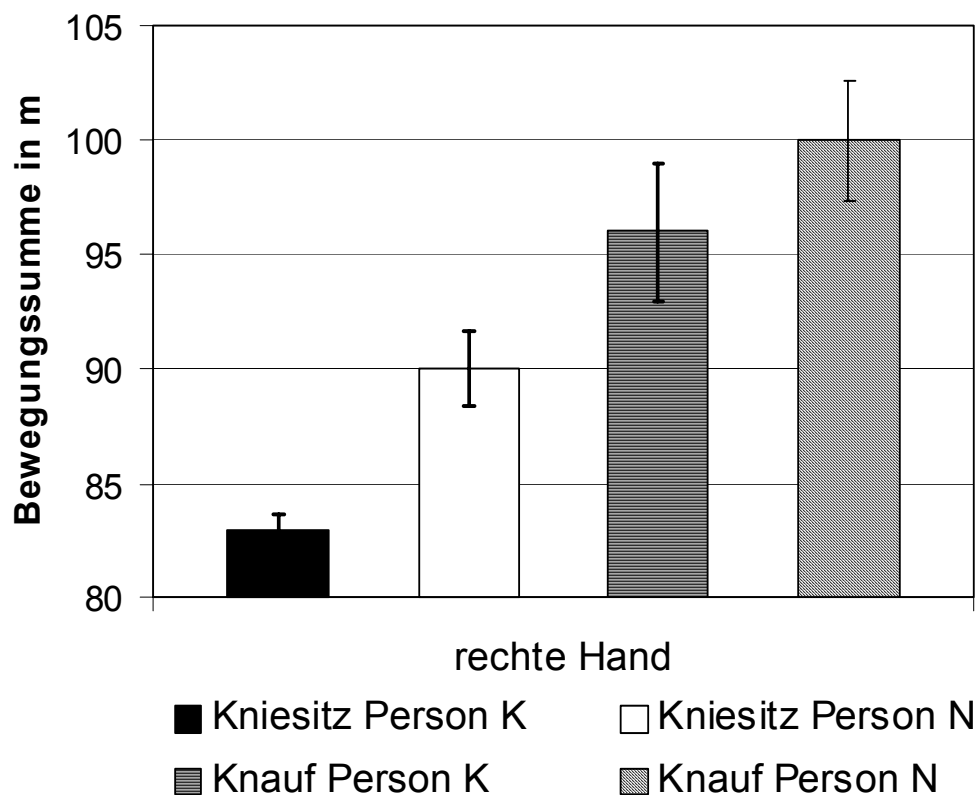


Abb. 24: Vergleich der aufgezeichneten Bewegungssummen der rechten Hand von zwei Probanden für beide Sitzplatzvarianten

Abbildung 25 zeigt die Unterschiede bei der Anwendung der verschiedenen Interpolationsalgorithmen auf. Je größer der Umfang der Sichtbarkeitsausfälle ist, desto stärker macht sich der auf dem Interpolationsalgorithmus beruhende Unterschied bemerkbar. Besonders gravierend waren die Unterschiede bei der Messung am Kopf, die durch den grau hinterlegten Bereich hervorgehoben werden. Die Erklärung liegt darin, dass es sich bei der Messung um eine Aufzeichnung von rechts handelte. Die Kopfdiode war jedoch mittig befestigt und wurde daher von den Kameras nur schlecht wahrgenommen.

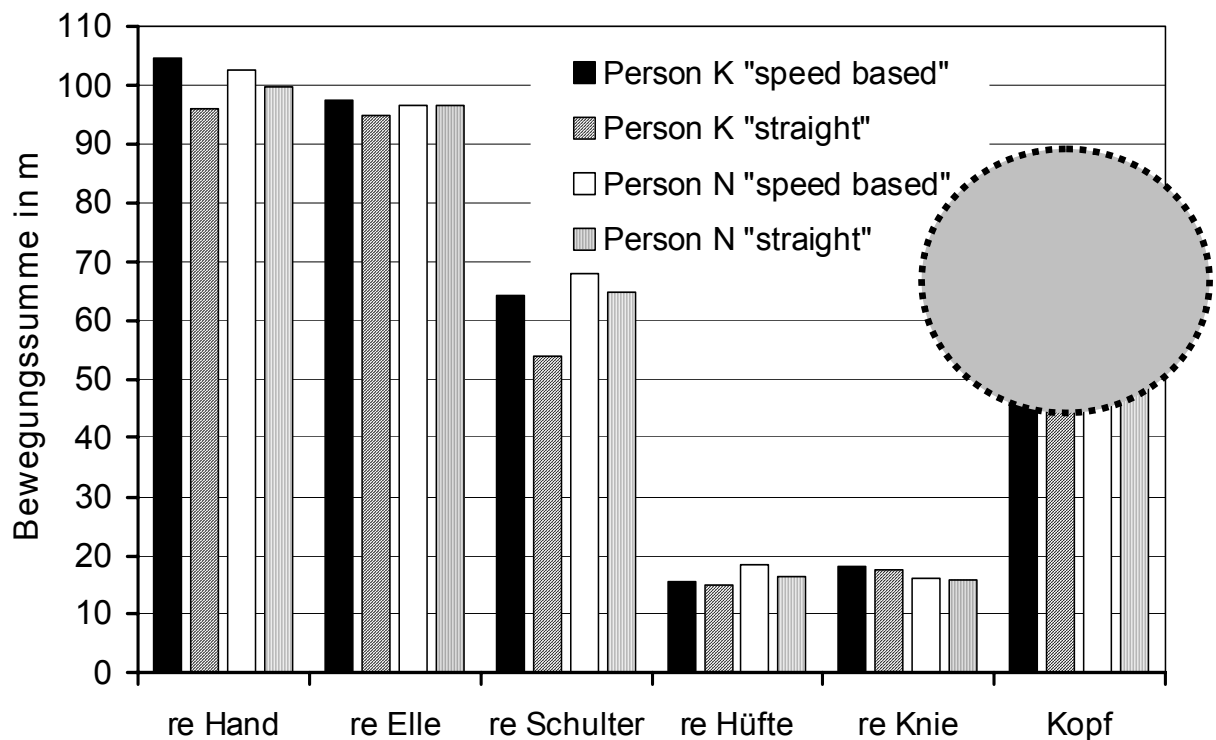


Abb. 25: Bewegungssummen in m für das Stechen von 50 Stangen für den Sitz mit Oberkörperstütze, Unterschiede der verschiedenen Interpolationsalgorithmen „speed based“ und „straight approximation“

Die Zeitspanne zwischen zwei Arbeitsabläufen war so groß, dass sich der Proband immer wieder in die Ausgangshaltung begab, um von dort aus zum nächsten genannten Ziel zu starten. Der in Abbildung 26 dargestellte Winkelverlauf des Oberkörpers zeigt dies besonders deutlich für die Kniesitzvariante (rechter Teil der Abbildung). Die Pause zwischen zwei Arbeitsabläufen ist am Ende der einzelnen Verlaufskurven beim Kniesitz besonders gut zu erkennen.

Die deutliche Trennung zweier Arbeitsabläufe durch eine kurze Pause ermöglichte im Nachhinein die Rückverfolgung einzelner Bewegungen, beispielsweise bei den Winkelverlaufsdigrammen. Da die Stechreihenfolge zuvor zufällig ermittelt wurde, jedoch für zwei verschiedene Durchläufe insgesamt festgelegt war, konnten sogar die Bewegungsabläufe für bestimmte Felder nachträglich ermittelt werden. In manueller Auswertung ist das jedoch ein sehr aufwendiger Prozess mit einem hohen Fehlerrisiko, da die Gesamtbewegung nach Ermessen des Nutzers wieder untergliedert wird. Die Gliederung orientiert sich an charakteristischen Bewegungsmus-

tern, wie im vorliegenden Fall beispielsweise an der am Ende des Bewegungsablaufes auftretenden aufrechten Sitzhaltung.

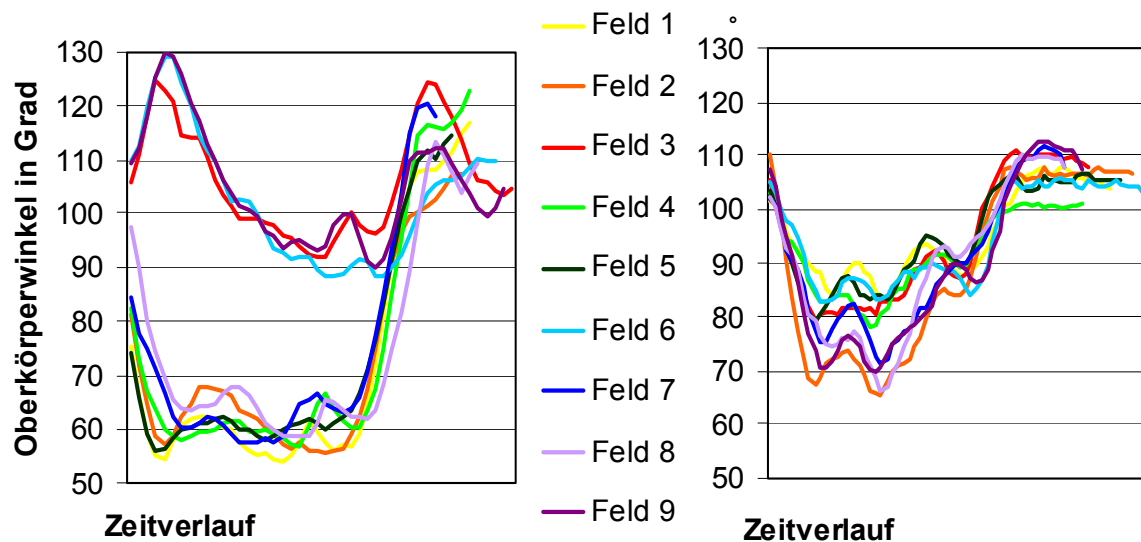


Abb. 26: Darstellung des Verlaufs der Oberkörperwinkel für die Oberkörperstütze (links) und den Kniesitz (rechts)

Der Vergleich der Winkelverläufe für den Oberkörper für das Stechen einer Stange zeigt deutliche Unterschiede in den Sitzplatzvarianten (Abbildung 26). Besonders auffällig ist der Unterschied der Winkelverläufe im linken Diagramm. Die oberen drei Winkelverläufe in der linken Grafik beziehen sich auf die Felder 3, 6 und 9. Sie befinden sich auf der rechten Seite des Damms. Die Felder 2, 5 und 8 liegen mittig direkt hinter der Stütze und 1, 4 und 7 auf der linken Dammseite (siehe auch Abbildung 23).

Für den Stechvorgang in der rechten Hälfte des Damms muss der Oberkörper weniger weit heruntergebeugt werden als für das Stechen in den anderen Feldern. Das Stechen in der Dammmitte hinter der Stütze kann nicht im angelehnten Zustand erfolgen, weil entweder die Arme nicht dort hinreichen, oder der dadurch ausgeübte Druck auf den Anlehnbereich als zu unangenehm empfunden wird. Die Arbeitskraft umwindet die Stütze und zeigt einen ähnlichen Oberkörperwinkelverlauf wie beim Stechen in der linken Hälfte. Die gewählten Bewegungsabschnitte zeigen eine deutliche Präferenz für das Stechen auf der linken Seite der Oberkörper-



perstütze. Der sichtbare Unterschied im Winkelverlauf belegt das von den Probanden geäußerte Gefühl der Behinderung des Arbeitsflusses durch die Stütze.

Die rechte Grafik zeigt einen gleichmäßigen Verlauf des Oberkörperwinkels beim Stechen auf dem Kniesitz. Die Lage des Spargels schlägt sich im Winkelverlauf nur leicht nieder.

Ein ähnlicher Verlauf über die Zeit zeigt sich in der Darstellung des Oberkörperwinkels und des Armöffnungswinkels der linken Körperhälfte (Abbildung 27).

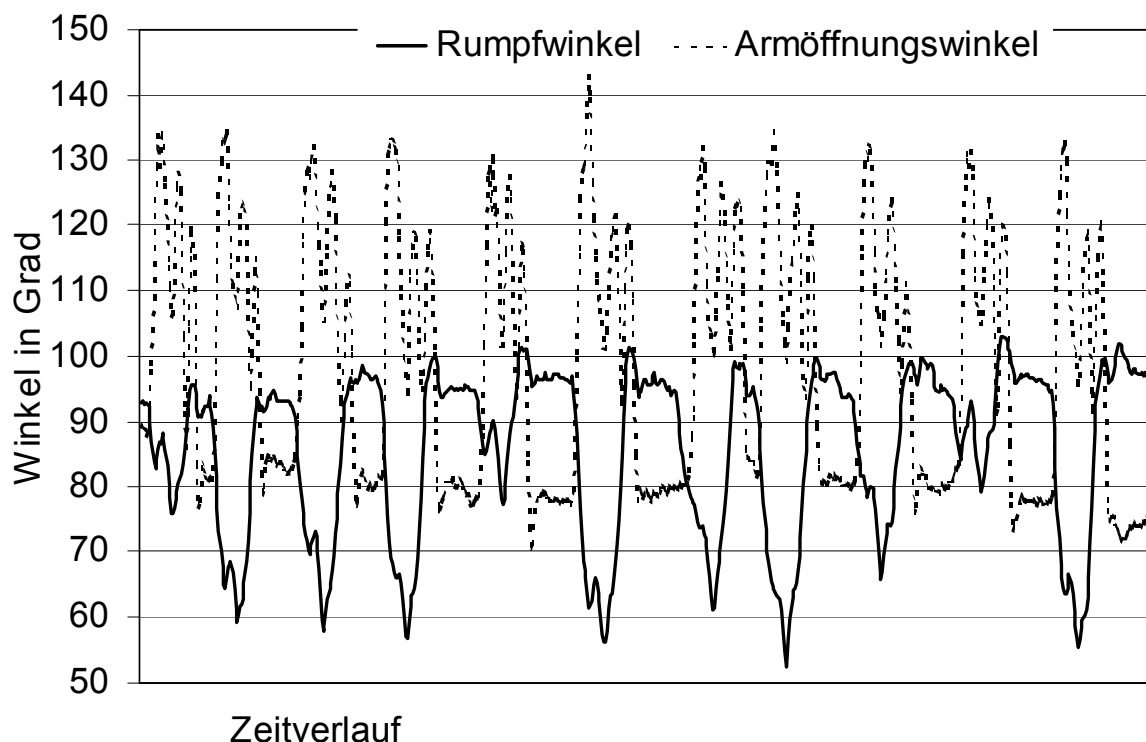


Abb. 27: Ausschnitt der gemessenen Rumpf- und Armöffnungswinkel im Zeitverlauf beim Stechen auf dem Kniesitz

Der Arbeitsablauf ist im Einzelnen gekennzeichnet durch ein Vornüberbeugen des Oberkörpers (der Rumpfwinkel wird kleiner) und durch ein Strecken des linken Armes (Armwinkel wird größer). Beim Winkelverlauf des Armes sind deutlich drei Phasen zu erkennen, welche die einzelnen Ablaufabschnitte der Tätigkeit des linken Armes widerspiegeln. Die maximale Streckung ist das Aufgraben, es folgt das Herausziehen der Stange und im Anschluss das Ablegen, in den Laborversuchen nur simuliert durch das Strecken des Armes neben dem Körper. In beiden Verlaufsdiagrammen lässt sich sehr gut die kurze Ruhephase erkennen, die sich immer wieder um einen Winkel von  $95^\circ$  für den Rumpfwinkel und um  $80^\circ$  für den

Armwinkel einpendelt. In der Ruhephase richtet sich die Arbeitskraft auf und lehnt sich an die Sitzlehne an.

Der kleinste Rumpfwinkel tritt bei der Simulation des Stechvorganges auf, ein Prozess, der mit einem gewissen Kraftaufwand verbunden ist. Trägt man die Winkel für den Arm und den Oberkörper auf jeweils einer Achse auf, erhält man ein Winkel-Winkel-Diagramm mit seinen den Bewegungsablauf charakterisierenden Formen. Es handelt sich dabei um eine sehr abstrakte Art der Darstellung. Für die Interpretation und Bewertung von Arbeitsabläufen liefert sie jedoch wichtige Ergebnisse. Abbildung 28 zeigt den von der Lage der Spargelstange abhängigen Unterschied im Bewegungsablauf auf dem Kniesitz. Die Stange in Feld 1 zu erreichen erfordert ein stärkeres Vornüberbeugen als es für Feld 9 erforderlich ist. Die Form der Kurve dagegen ist nahezu identisch, sie ist lediglich auf der x-Achse um etwa 15° verschoben. Eine solche Übereinstimmung konnte auf dem Sitz mit der Oberkörperstütze nicht beobachtet werden. Die Kongruenz von Bewegungsabläufen ist ein Zeichen für Übung und ein Zeichen guter Arbeitsplatzgestaltung. Je gleichmäßiger die Bewegungen erfolgen, desto stärker sind die Übereinstimmungen der Winkelverlaufslinien. Die Dauer der eingenommenen Körperhaltungen lässt sich aus dem Winkel-Winkel-Diagramm nicht ablesen.

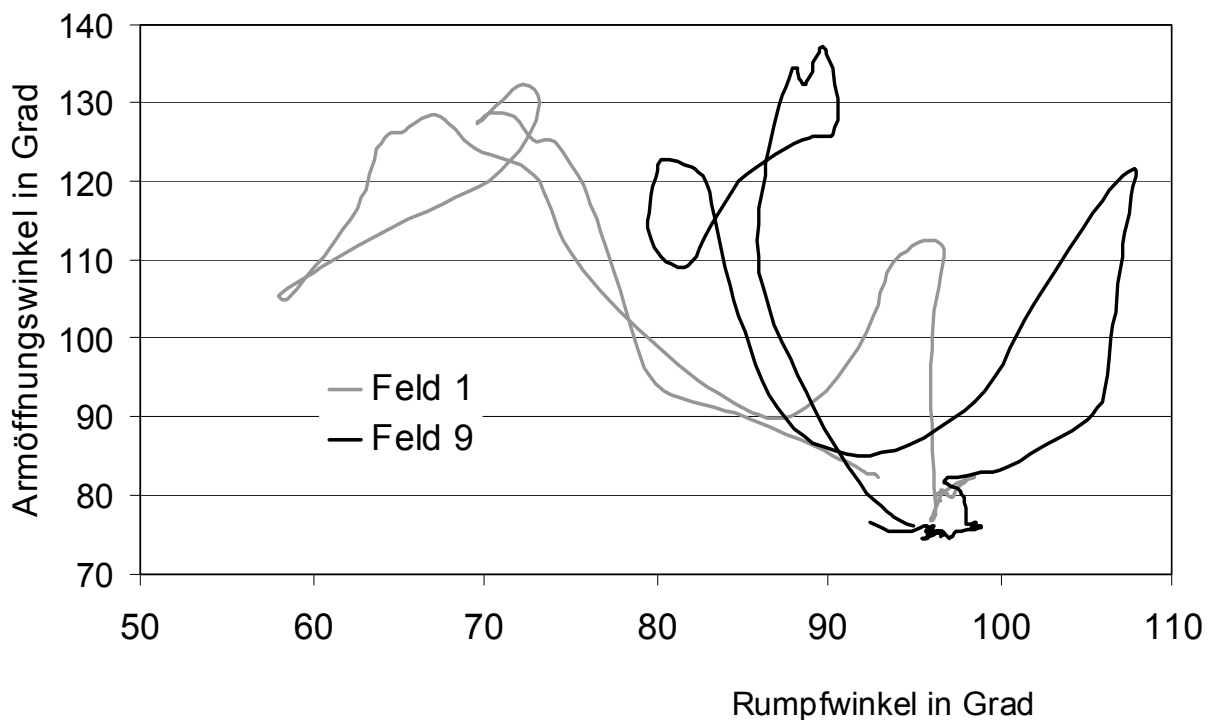


Abb. 28: Verlauf von Armöffnungswinkel und Rumpfwinkel für das Stechen einer Stange auf dem Kniesitz (linke Körperhälfte)

Bei der Auswertung der Ergebnisse konnte festgestellt werden, dass die Aufzeichnungsgüte, die Systemgenauigkeit und der dem Indikator zugrunde liegende Berechnungsalgorithmus einen Einfluss auf das Ergebnis haben. Wie sich zwei verschiedene Rechenwege auf die Winkelgrößen auswirken, ist in Abbildung 29 dargestellt.

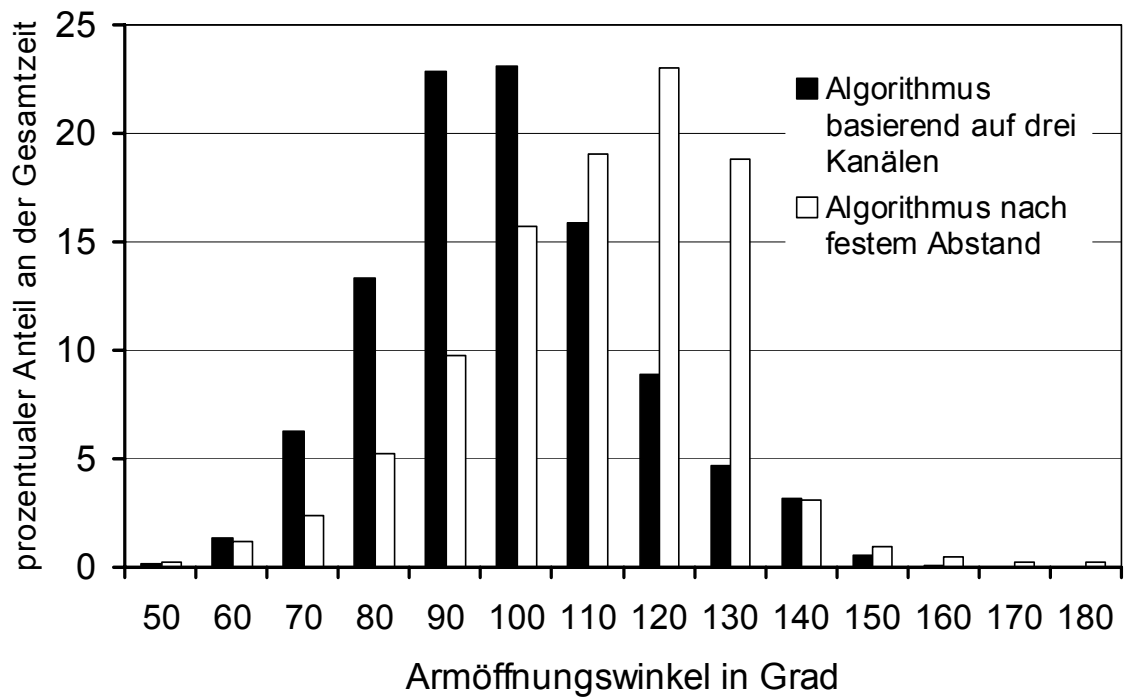


Abb. 29: Prozentuale Anteile der Armöffnungswinkel (rechts) auf dem Kniesitz bei Verwendung von unterschiedlichen Algorithmen zur Winkelberechnung

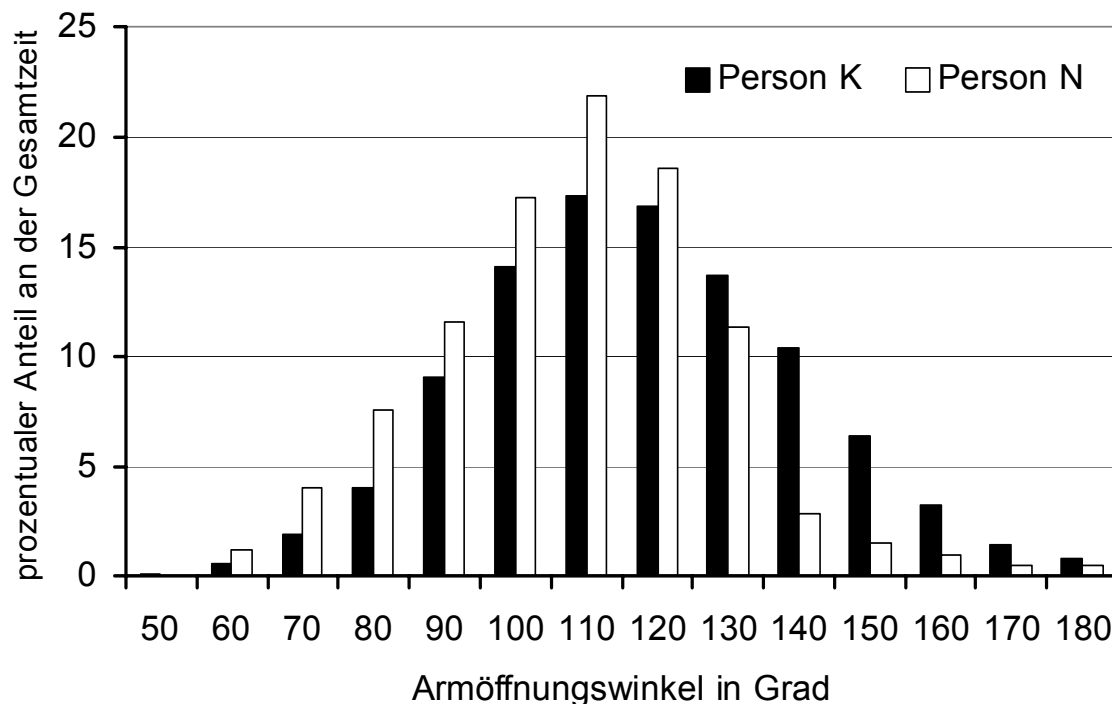


Abb. 30: Prozentualer Anteil der Armwinkelöffnungswinkel (links) bei zwei Personen im Arbeitsverlauf auf dem Sitz mit Oberkörperstütze

In der Abbildung 29 zeigt sich eine deutliche Verschiebung der auftretenden Winkel um etwa  $20^\circ$  nach oben, wenn die am Probanden gemessenen Diodenabstände als Berechnungsgrundlage verwendet werden (siehe 4.4.1.8).

Person K und Person N weisen eine sehr ähnliche Verteilung bei den prozentualen Anteilen der gemessenen Armwinkel auf. Es handelt sich bei Person K um den Durchschnitt aus 200 Stechvorgängen und bei Person N um den Durchschnitt aus 150 Stechvorgängen. In der Praxis liegen die Stechleistungen bei rund 400 Stangen/Stunde, wobei diese sehr vielen Einflussfaktoren unterworfen sind. Die in die Abbildung einbezogenen Werte repräsentieren somit etwa eine halbe Stunde Arbeit unter Praxisbedingungen. Die Darstellung der prozentualen Anteile gemessener Winkel ist besonders geeignet, um die Quantität kritischer Winkelgrößen darzustellen.

Neben den Vergleichen von Bewegungen und dem auftretenden Bewegungsaufwand sollte die Sitzhaltung auf beiden Geräten verglichen werden. Der Kniesitz bietet der Arbeitskraft eine Rückenlehne, diese lässt sich jedoch nur in Ruhepha-

sen nutzen. In angelehnter Position kann der Damm mit gestreckten Armen nicht erreicht werden. Der Sitz mit der Oberkörperstütze hat keine Rückenlehne, so dass es einer ausreichenden Selbstdisziplin bedarf, eine aufrechte Sitzhaltung einzunehmen. Das betrifft sowohl die Ruhephasen als auch den Arbeitsprozess. Inwieweit eine aufrechte Sitzhaltung auf beiden Sitzen gewährleistet ist, ergab der Vergleich der Abstände zwischen Schulter und Hüfte.

Eine gute Sitzposition wird charakterisiert durch eine aufrechte, der gesunden Krümmung der Wirbelsäule folgenden Haltung mit einer Kyphose im Bereich der Brustwirbel und einer Lordose im Bereich der Lendenwirbel (siehe Abbildung 31). In dieser Haltung wurde der Abstand zwischen den an den Probanden befestigten Markern an der Schulter und der Hüfte für jede Variante gemessen und notiert. Dieser Wert dient für den weiteren Interpretationsverlauf als Referenzwert, d.h. für die Interpretation der Abstände werden alle Messwerte um den Referenzwert korrigiert.

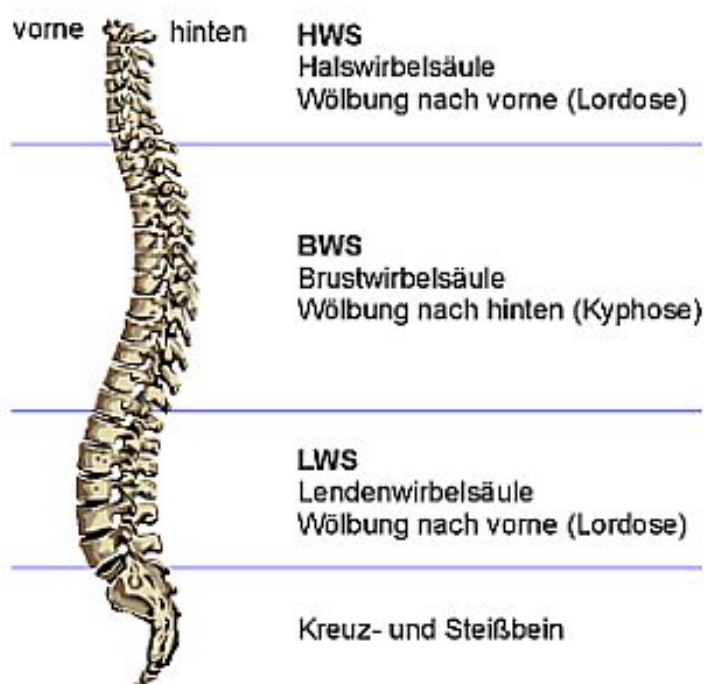


Abb. 31: Darstellung der typischen Doppel-S-Krümmung der Wirbelsäule  
(aus: <http://www.biomedicus.de/krankheit/wirbels1.htm>)

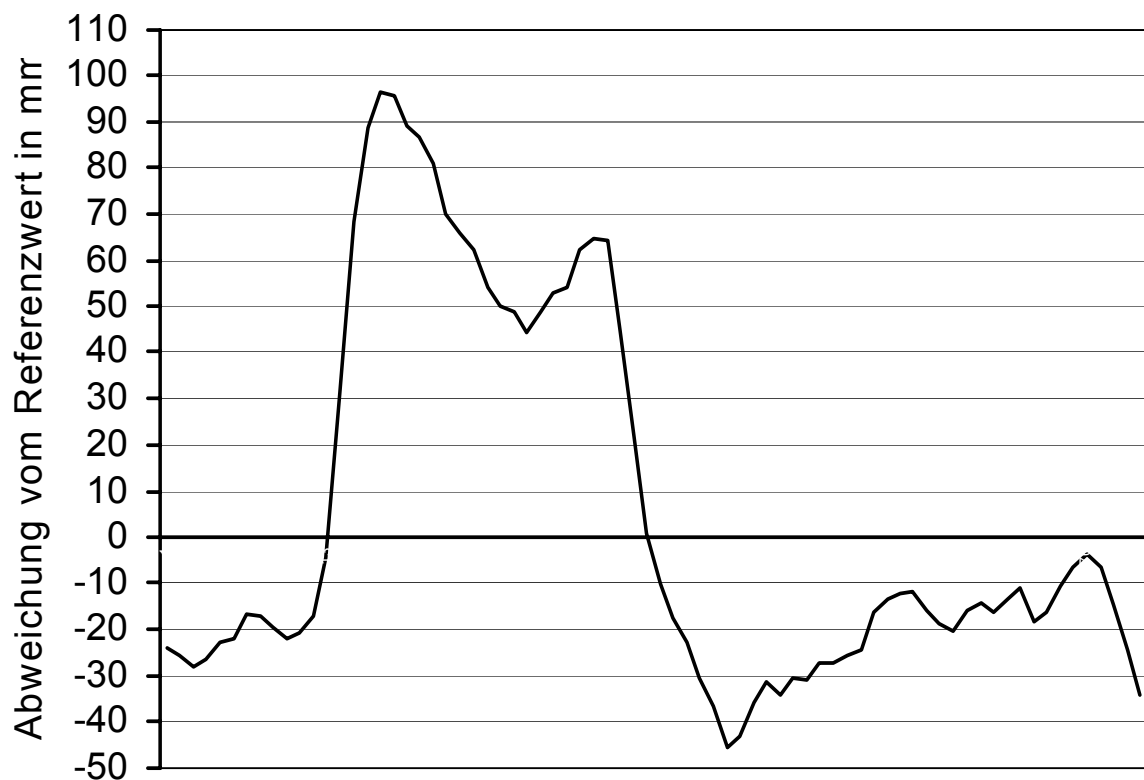


Abb. 32: Verlauf der Abweichungen des Schulter-Hüft-Abstandes vom Referenzwert bei Person K auf dem Sitz mit der Oberkörperstütze

Für die Bestimmung der Abweichung vom Referenzwert wurden alle Abstände zwischen Schulter und Hüfte aus den Messungen ermittelt. Alle Werte, die nach der Korrektur um den Referenzwert größer als Null waren, wurden vernachlässigt. Interpretiert wurden jedoch die Werte, die kleiner waren als die, welche der gesunden Ausgangshaltung entsprachen. Nur eine zunehmende Kyphosierung des Rückens ermöglicht eine Verkürzung des Abstandes zwischen der Schulter und der Hüfte, was einer im Volksmund als Rundrücken bezeichneten Haltung entspricht. Bei annähernd gleich langen Messungen kann über die Summe der negativen Werte das Ausmaß der gekrümmten Sitzhaltung verglichen werden.

In Abbildung 32 ist der Verlauf der Abweichung des Schulter-Hüft-Abstandes vom Referenzwert für einen kurzen Zeitraum dargestellt. Alle Werte unterhalb der x-Achse weisen auf eine nicht-aufrechte Sitzhaltung hin.

Das Ausmaß der Kyphose steigt, je mehr Werte unterhalb der x-Achse zu finden sind und je kleiner sie sind. Der Vergleich der Summe aller Werte  $< \text{Null}$  (Abbildung 33) beschreibt das Ausmaß eines auftretenden Rundrückens auf den verschiedenen Sitzen. Der Vergleich der Werte bezieht sich auf einen Arbeitsumfang von 200 Stangen bzw. einen Zeitumfang von etwa 30 Minuten.

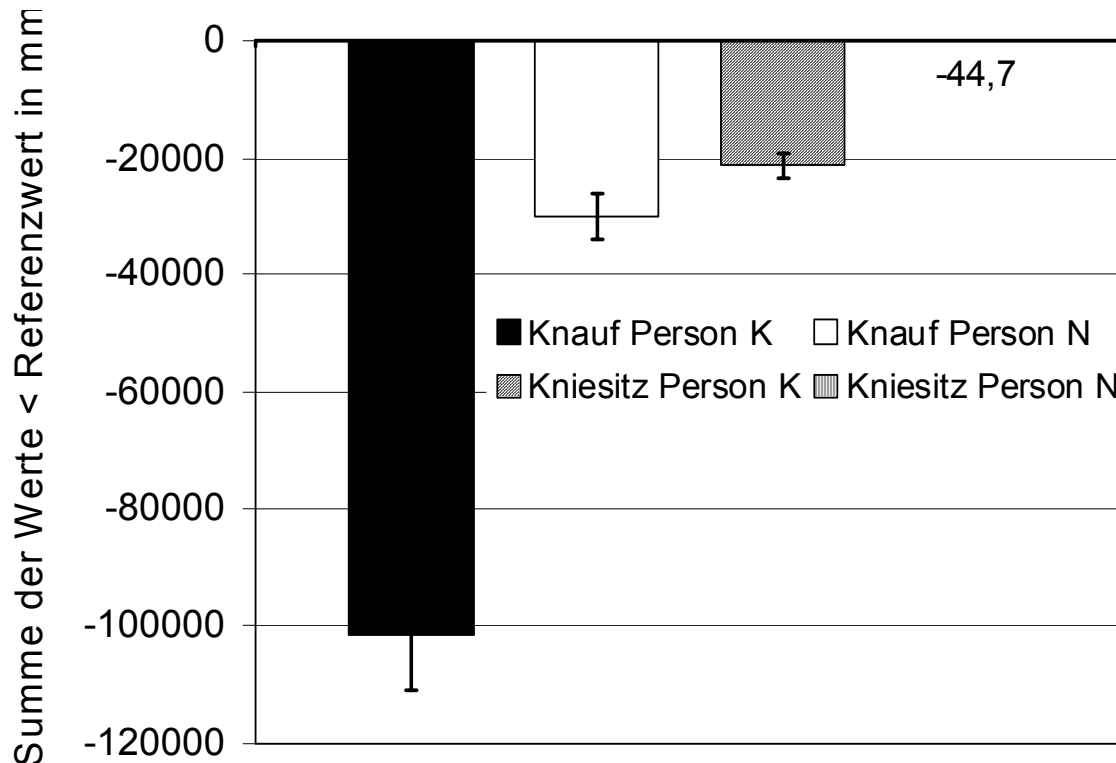


Abb. 33: Summe aller Schulter-Hüftabstände (in mm)  $< \text{Null}$  auf den verschiedenen Sitzen bei zwei Probanden

Es traten starke personenspezifische Variationen beim Ausmaß der Wirbelsäulenkrümmung auf. Die Inzidenz eines Rundrückens ist beim Sitz mit Knauf, unabhängig von der Arbeitskraft gegeben, das Ausmaß variiert jedoch zwischen den Personen sehr stark. Person K zeigte einen vier mal so hohen Summenwert wie Person N. Auf dem Kniesitz zeigte Person K einen nur geringfügig niedrigeren Wert als Person N auf dem Sitz mit Knauf. Person N wiederum zeigte auf dem Kniesitz einen Wert von nur 44 mm.

Der Summenwert erlaubt keine Unterscheidung im zeitlichen Umfang, da ein ständig leicht gekrümmter Rücken den gleichen Wert ergeben kann wie ein nur kurzzeitig stark gekrümmter Rücken.

### 5.2.3 Diskussion

Der Sitzplatz einer Spargelerntehilfe unterscheidet sich wesentlich von einem herkömmlichen Sitzarbeitsplatz. Die Arbeitsaufgabe unterscheidet sich ebenfalls von einer sitzenden Tätigkeit wie beispielsweise der im Bürobereich. Die ergonomische Gestaltung von dort üblichen Tisch-Stuhl-Systemen ist mittlerweile grundlegend erforscht (Lange 1991), die Erkenntnisse lassen sich jedoch auf den dargestellten Sitzplatz nur begrenzt übertragen.

Der zu erreichende Arbeitsbereich beim Spargelstechen liegt außerhalb des optimalen Greifraumes für einen Sitzplatz. Der Arbeitsbereich ist nicht veränderlich und somit nur durch das Anbringen von Hilfsmitteln am Sitzelement besser zu erreichen. Bei den Hilfsmitteln handelt es sich in den untersuchten Fällen um Kniepolster bzw. um eine Oberkörperstütze. Zusätzlich müssen für das Sitzen untypische, dynamische Bewegungen ausgeführt werden, um zum Zielobjekt zu gelangen. Da sich der im Boden wachsende Spargel auch bei einem Steharbeitsplatz außerhalb des optimalen Greifraumes befindet, steht zur Diskussion, ob die Ernte im Sitzen als weniger belastend anzusehen ist.

Die Gefahr der Bewegungsarmut, ein Risikofaktor sitzender Tätigkeiten, und daraus resultierende Schmerzen im Schulter/Nackenbereich bestehen auf der Spargelerntehilfe nicht. Das Sitzen ist dynamisch. Dennoch ist zu beachten, dass der Mensch nicht für das Sitzen prädestiniert ist.

Neben der subjektiven Bewertung der beiden Sitzplätze durch 15 zusätzliche Testpersonen im Rahmen eines Kurzversuchs ergab sich nach den bewegungsanalytischen Untersuchungen eine positive Bilanz für den mit Kniepolstern ausgestatteten Sitz. Weiterhin offen bleibt die Frage der Gewichtung der verschiedenen, im Ergebnisteil vorgestellten Indikatoren für die endgültige Urteilsfindung bzw. bezüglich eventueller gesundheitsschädigender Wirkungen. Während auf dem Kniesitz bei den Probanden eher Schmerzen im Bereich der Wirbelsäule auftraten, die sich mit größter Wahrscheinlichkeit auf eine mangelnde Rückenmuskulatur zurückführen lassen, ist bei der Anlehnvariante die Wahrscheinlichkeit größer, einen Krummrücken auszubilden. Letzteres wird anhand von Zahlenwerten (Abbildung 33) aus der Bewegungsanalyse belegt.



Die Oberkörperstütze wurde im Arbeitsablauf von allen Probanden als hinderlich empfunden. Der Verlauf der Bewegungslinien bestätigte diesen Befund. Die Ausführungsbedingungen sind somit bei der Anlehnvariante suboptimal, was sich in der geringeren Kongruenz der Bewegungsverläufe widerspiegelt (Abbildung 26). Da die Versuche mit der Knievariante begonnen wurden, kann die geringere Kongruenz voll auf das Arbeitsmittel zurückgeführt werden. Bei umgekehrter Reihenfolge wäre ein noch nicht ausreichender Übungsgrad als weitere Begründung in Betracht zu ziehen.

Die Beschreibung eines Bewegungsablaufes in Form auftretender Körperwinkel in einem Winkel-Winkel-Diagramm erbringt, in Abhängigkeit der variablen Lage des Produktes, einen mehr oder weniger breiten Kurvenverlauf als charakteristisches Bild der Aufgabe. Abbildung 28 zeigt den lageabhängigen Verlauf des Rumpfwinkels sehr deutlich. Die Kurvenform für beide Stechprozesse ist nahezu identisch, lediglich um die Verkleinerung des Rumpfwinkels verschoben.

Die verschiedenen aufgabenspezifischen Einflussfaktoren verändern also den Verlauf der Kurve, da sich die Körperhaltung den jeweiligen Bedingungen anpasst. Durch farbliche Kennzeichnung des Graphen können kritische Bereiche hervorgehoben werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse wurden die Oberkörperwinkel und die Armöffnungswinkel miteinander in Bezug gesetzt. Diese Betrachtungsweise nähert sich ein Stück der komplexen Wirkungsweise des menschlichen Bewegungsapparates. Der Prozess des Hinlangens zu einem weiter entfernten Gegenstand im Sitzen wird durch die Bewegung des Oberkörpers beschrieben, gleichzeitig bewegt sich der Arm in Zielrichtung. Erst die kombinierte Betrachtungsweise aller, den Arbeitsablauf betreffenden Bewegungen ermöglicht einen vollständigen Vergleich.

Betrachtet man die verschiedenen Diagramme auf den beiden Erntehilfen, so ist bei der Anlehnvariante in den Winkel-Winkel-Diagrammen eine geringere Kongruenz der Kurvenverläufe zu erkennen (Abbildung 26). Eine dennoch vorhandene Überlagerung der Winkelverläufe belegt die Reliabilität der Messungen. Es bestehen zwar große Unterschiede in den gemessenen Winkeln, die personenspezifisch oder aufgabenspezifisch sind, das Erscheinungsbild des Kurvenverlaufs ist dennoch wiedererkennbar. Der Einsatz der Methode ist sowohl für den Vergleich

zweier Varianten als auch für den kontinuierlichen Verbesserungsprozess eines Arbeitsplatzes in Bezug auf die Anpassung an den Menschen und die Aufgabe denkbar, z.B. durch die Erfassung und Vermeidung des Auftretens ungünstiger Winkelgrößen. Durch Verlängerung der Messungen ließen sich ermüdungsbedingte Einflüsse feststellen, die sich beispielsweise in einer Abnahme der Amplituden äußern könnten. Für die Interpretation von Winkelverläufen ist die genaue Kenntnis der Aufgabe von grundlegender Bedeutung. Eventuelle Störfaktoren können nur erkannt werden, wenn sie sich auftretenden Winkeln zuordnen lassen. Die Bewegungsaufzeichnung erfordert somit immer eine exakte Dokumentation. Im Grundsystem erfolgt dies durch simultane Videoaufzeichnung. Der Videosequenz wird zu jedem Zeitpunkt ein Zifferncode zugeordnet, der auch jeder aufgezeichneten Raumkoordinate voransteht.

Die in den Abbildungen 29 und 30 dargestellten prozentualen Anteile der Winkelgrößen für den Winkel um die Elle unterstreichen zum einen personenspezifische Unterschiede in der Aufgabenausführung, zeigen auf der anderen Seite den Einfluss der Messgüte. Die um  $20^\circ$  verschobenen Winkelgrößen durch Verwendung verschiedener Berechnungsalgorithmen können auf ungenügender Sichtbarkeit oder nicht genügend fixierten Markern beruhen. Die exakte Berechnung von Winkeln erfordert somit eine sehr gute Sichtbarkeit aller Punkte.

Für die Bewertung der Sitzhaltung wird in der Praxis unter anderem der Oberkörperwinkel, auch als Leistenbeugewinkel bezeichnet, herangezogen. Bei einem Leistenbeugewinkel von  $110^\circ$  erreicht die Bandscheibenflächenpressung ein Minimum, wenn der Oberkörper von einer geeigneten Rückenlehne aufgefangen wird. In einer vornüber gebeugten Sitzhaltung, die häufig aus Bequemlichkeit gewählt wird, ist die Bandscheibenflächenpressung wesentlich höher (Hettinger & Wobbe 1993). Der Kniesitz bietet eine Rückenlehne, so dass es der Arbeitskraft zumindest in den Arbeitspausen möglich ist, eine aufrechte und gestützte Sitzhaltung einzunehmen. Die in Abbildung 26 und 27 dargestellten Verläufe der Oberkörperwinkel zeigen auf, dass eine entspannte Sitzhaltung auf dem Sitz mit den Kniepolstern knapp unter  $110^\circ$  liegt. Die Werte für die Oberkörperstütze schwanken, was sicherlich durch die fehlende Begrenzung durch eine Rückenlehne zu erklären ist. Ebenso weisen die Probanden auf dem Sitz mit der Oberkörperstütze

eine größere Tendenz einer Rundrückenhaltung auf (Abbildung 33). Es ist davon auszugehen, dass in entspannter Haltung ohne Rückenlehne, ein Rundrücken häufiger zu beobachten ist. Eine quantitative Erfassung dieser Erscheinungsform ist über die Bewegungsanalyse möglich. Ähnliche Untersuchungen sind aus dem Bürobereich bekannt, wo mittels Multimomentaufnahmen die prozentualen Anteile der Arbeitszeit in den verschiedenen Sitzhaltungen ermittelt wurden. Multimomentaufnahmen basieren jedoch auf der Einschätzung durch einen Beobachter. Die festgestellten personenspezifischen Schwankungen in Abbildung 33 belegen, dass neben dem Arbeitsmittel noch andere Einflüsse auf die Sitzhaltung wirken.

Anhand der dargestellten Indikatoren konnte gezeigt werden, dass eine Oberkörperunterstützung über Knieschalen die geeignetere Variante für die untersuchte Tätigkeit ist. Zu bedenken bleibt weiterhin, dass Arbeiten im Knien zu gesundheitlichen Schädigungen führen können (Schildge 1995). Dennoch ist der untersuchte Kniesitz nicht direkt mit Arbeiten im Knien zu vergleichen, unter anderem aufgrund des zusätzlich vorhandenen Sitzes. Im Vergleich zum gebückten Stehen ist weiterhin der Energieverbrauch im Knien ca. 20% geringer (Timme 1990). Somit dürfte die Ernte auf einem geeigneten Sitz gegenüber der Ernte im gebückten Stehen zu bevorzugen sein. Bei einer aufrechten Sitzhaltung, die nur auf dem Kniesitz gewährleistet ist, ist die Flüssigkeitsversorgung der Bandscheiden günstiger als im gebückten Stehen.

## 6 Abschließende Bewertung der Methode

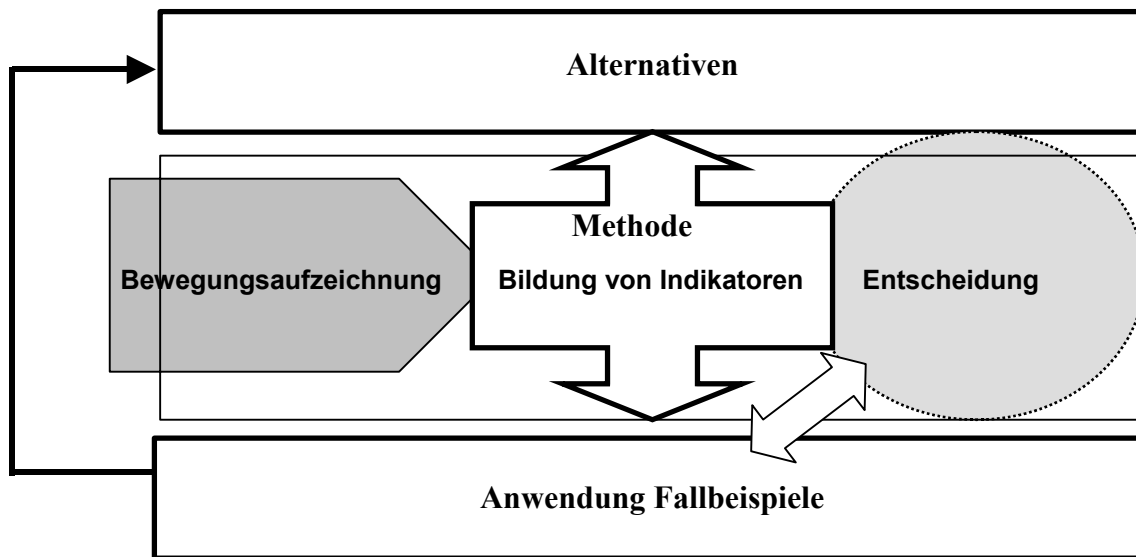


Abb. 34: Schematischer Ablauf der Methodenentwicklung

Hauptbestandteil der Zielsetzung war die Bildung relevanter Indikatoren für den Vergleich der aufgezeichneten Bewegungsdaten. Der Nutzer gewinnt so aus den Daten Informationen, die als Basis für Entscheidungsfindungen dienen und das Wissen über Bewegungsabläufe erweitern. Im Ergebnisteil wurden Anwendungsbeispiele dargestellt und die definierten Indikatoren anwendungsorientiert diskutiert. Im folgenden werden alternative arbeitswissenschaftliche Methoden mit dem neuen System verglichen und in einem weiteren Schritt der mögliche Wissenszuwachs bezogen auf die Thematik im Forschungsbereich dargestellt.

### 6.1 Vergleich mit bisher angewandten Methoden

Das Bewegungsstudium verfolgt zwei Gestaltungsprinzipien: Es sollen Bewegungen vereinfacht werden, und es sollen Bewegungen verdichtet werden. Das gemeinsame Ziel ist, die Ausführungszeiten zu reduzieren. Das Hauptaugenmerk bei der Gestaltung ortsfester Arbeitsplätze, auf die sich der Einsatz des vorhandenen Bewegungsanalysesystems derzeit beschränkt, liegt auf den Hand-Arm-Bewegungen, dem Hinlangen, Greifen, Loslassen, Bringen oder Fügen. Wesentliche Einflussgrößen sind beim Bringen die Bewegungslänge, beim Greifen im Besonderen die Gegenstandslage und beim Fügen die geforderte Genauigkeit am

Ende der Bewegung. Jeder dieser Einflussfaktoren verändert die für die Bewegung notwendigen Ausführungszeiten.

### ***Systeme vorbestimmter Zeit***

Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden diese Abhängigkeiten von F.B. Gilbreth (1868-1924) genau untersucht und Mitte des Jahrhunderts in den Systemen vorbestimmter Zeit (SvZ) weltweit bekannt. Um Systeme vorbestimmter Zeiten erfolgreich anzuwenden, muss der genaue Bewegungsablauf bekannt und möglichst standardisiert sein. Andernfalls entsteht ein erheblicher Aufwand für die Berechnung der Zeiten, um alle auf die Ausführungszeit wirkenden Eventualitäten zu berücksichtigen. Die Bewegungslänge für das Hinlangen und Bringen sollte für eine exakte Zeitvorhersage auf etwa 2 cm genau bekannt sein. Wichtig ist hierbei, dass die Arbeiten vom Menschen voll beeinflussbar sind. Die Umsetzung der Methode im Gartenbau kann sehr aufwendig sein, da die Arbeitsabläufe weniger standardisiert sind als in der industriellen Produktion. Form und Lage der Produkte variieren häufig, wodurch sich die aus den Tabellen zu entnehmenden Zeiten für jeden Arbeitsablauf verändern. Die Zeiten entsprechen dann nur jeweils einer Planungssituation und berücksichtigen weiterhin nicht die produktionsspezifischen Variationen oder die von der Arbeitsplatzgestaltung ausgehende Belastung (Kluth 1994).

Eine genaue Vorhersage für den Zeitbedarf, beispielsweise bei der Spargelernte, mittels SvZ scheint nahezu unmöglich, da weder die genaue Lage der Spargelstange im Damm vorhergesagt werden kann noch der Abstand von einer Stange zur nächsten etc.. Im Nacherntebereich ist der Einsatz dieser Systeme denkbar und macht ohne weitere Untersuchungen deutlich, dass beispielsweise die Reduzierung von Weglängen Zeit einspart, wie es die unter 5.1 beschriebenen Ergebnisse der ungünstigen Varianten durch die stark gestiegenen Bewegungssummen belegen. Da jedoch selbst die Kenntnis solcher überflüssigen Bewegungen nicht grundsätzlich dazu führt, dass sie vermieden werden, ist die Überprüfung bestehender Handlungsabläufe Grundlage für ein systematisches Vorgehen bei der Entwicklung neuer Handlungsweisen.

### **Zeitstudien**

Da sich SvZ im Gartenbau nicht etablieren konnten, wird häufig die Ist-Zeitanalyse für die Verbesserung von Arbeitssystemen verwandt (z.B. Stoffert & Rohlfing 1980, 1982), durchgeführt nach den Kriterien vom REFA.

Im Rahmen einer Zeitstudie werden die für bestimmte, in Ablaufabschnitte unterteilte, Arbeitsaufgaben benötigten Einzelzeiten ermittelt. Über die Ergebnisse können Problembereiche aufgedeckt werden. Die Zeit allein berücksichtigt jedoch nicht den dafür benötigten Aufwand, z.B. die Art der Bewegung oder die eingenommene Körperhaltung. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass eine ungünstige Arbeitsplatzgestaltung von einem motivierten Mitarbeiter durch schnelleres Arbeitstempo kompensiert wird (Abbildung 15). Die Zeit für die Ausführung einer Aufgabe ist unter anderem abhängig vom Leistungsangebot der Arbeitskraft. Dieser Variation im Leistungsangebot soll in Form der Leistungsgradbeurteilung entgegen gewirkt werden. Die Ist-Zeiten werden um den Leistungsgrad bereinigt. Basis des Leistungsgrades ist die Beurteilung des Bewegungsablaufes, der durch die Intensität und die Wirksamkeit beschrieben wird.

Im Rahmen einer genauen Leistungsgradvergabe müssten die aufgenommenen Zeiten in Zeitstudien automatisch an die gestiegene Bewegungsgeschwindigkeit angeglichen werden, sofern sie als ein Abweichen von der als besonders harmonischen, natürlichen und ausgeglichenen Arbeitsweise vom Zeitnehmer erkannt wird. Ob eine solche Kompensation erschwerter Bedingungen beispielsweise durch erhöhtes Arbeitstempo wirklich über den Leistungsgrad verrechnet wird, ist stark von der Kompetenz des Zeitnehmers abhängig. Somit ist die Erfassung der Zeitdauer als wirtschaftlich bedeutendster Faktor für die ganzheitliche Bewertung der Arbeitsgestaltung nicht ausreichend. Im vorliegenden Fließbandversuch (5.1) konnte die Leistung bei ungünstiger Produktbereitstellung unverändert beibehalten werden, die Belastung hingegen ist durch die weiteren Wege und das Rumpfbeugen (Abbildung 16 und 17) gestiegen.

### **Körperhaltungsanalysen**

Eine Besonderheit im Gartenbau sind die durch die Produktionsprozesse bedingten ungewöhnlichen Körperhaltungen. In Regelwerken werden diese zum Teil als nicht akzeptabel gewertet bzw. ohne weitere Möglichkeiten der Differenzierung ausschließlich in Maßnahmenklassen hoher Dringlichkeit eingeordnet. Da die Aus-

führung dieser Prozesse im Rahmen der Ernte und Nachernte auf dem derzeitigen Stand der Technik noch unvermeidbar ist, sind vorhandene Regelwerke in diesen Fällen weder hilfreich noch anwendbar. Es gibt keine oder kaum Daten, die diese „ungewöhnlichen“ Arbeitshaltungen, wie sie beispielsweise bei der Ernte am Boden oder dem sitzenden Spargelstechen zu finden sind, beschreiben und zu verbessern helfen. Die im Rahmen der Spargelsitzplatzversuche durchgeführten Körperhaltungsanalysen über die computergestützte Bewegungsanalyse geben die Möglichkeit, die auftretende Belastung objektiv zu bewerten. Erst eine Verknüpfung mehrerer Indikatoren ermöglicht eine objektive Entscheidungsfindung für oder gegen eine Variante. Dabei ist als besonders vorteilhaft anzusehen, dass die Untersuchungen im laufenden Arbeitsprozess erfolgen und somit die Einflüsse, und zwar sowohl die aus der Arbeitssituation als auch die individualspezifischen, mit in die Bewertung eingehen.

Eine Körperhaltungsanalyse kann ohne technischen Aufwand mit der OWAS-Methode (Ovako Working Posture Analysing System, 1974 in Finnland entstanden) erfolgen. Ein Nachteil der Methode besteht allerdings darin, dass lediglich statische Körperhaltungen erfasst werden, d.h. die Körperdynamik wird nicht in die Bewertung mit einbezogen. Gerade die Rumpfneigung ist jedoch eine für die Wirbelsäulenbelastung wichtige Größe. Muskel-Skelett-Erkrankungen betreffen mit ca. 30% einen großen Teil der Berufstätigen, die Beschäftigten in der Landwirtschaft zählen zu den besonders gefährdeten Berufsgruppen. Die mit OWAS möglichen Klassifizierungen für eine Körperhaltungsanalyse sind sehr grob, Unterteilung in Oberkörper „gerade“ und „gebeugt“, und sind sicherlich nicht ausreichend für einen Beleg der aus Tätigkeiten möglicherweise resultierenden Schädigung der Arbeitskraft. Wichtige Informationen über die Dauer der Belastung und die Bewegungsgeschwindigkeit werden ebenfalls nur grob bzw. gar nicht erfasst. Dennoch wurde OWAS in der Landwirtschaft schon häufig eingesetzt und ist gegenüber einem gänzlichen Verzicht auf eine Bewertung der Körperhaltung in jedem Falle vorzuziehen.

Die Schwierigkeit einer Körperhaltungsanalyse liegt ferner nicht in der Bestimmung der Körperhaltung selbst, sondern vielmehr in der Auswahl und Bewertung relevanter Parameter, welche eine Körperhaltung beschreiben. Eine Bestimmung der Körperhaltungen mit dem Bewegungsanalysesystem kann beispielsweise im

Anschluss an eine OWAS-Analyse durchgeführt werden, um bei festgestellten dringlichen Änderungserfordernissen genauere Daten zu liefern und die Aussage zu verfeinern.

Neben der OWAS-Methode existieren noch zahlreiche andere Verfahren, die, basierend auf Beobachtungen, auftretende Körperhaltungen anhand von Skalen mehr oder weniger genau bestimmen. In einer Untersuchung von Lowe (2003) wurde festgestellt, dass bei geübten Ergonomen die Neigung besteht, die Abweichung der Haltung von der Ausgangsposition sowie ihren zeitlichen Umfang zu unterschätzen. Feinere Skaleneinteilungen unterlagen einer höheren Fehlerquote, der absolute Fehler wird jedoch geringer, da er selten über ein Skalenteil hinausreichte. Woodcock Webb (in Aghazadeh 1988) hingegen berichtet von einer Überbewertung der Beanspruchung bei Selbstbeurteilungen. Bei der Anwendung der auf der subjektiven Einschätzung der Beobachter oder der Arbeitskraft selbst basierenden Ergebnisse sind die genannten Probleme denen der geringeren Kosten oder einfacheren Handhabung gegenüberzustellen. Die von den genannten Autoren beschriebenen Abweichungen, nämlich das Über- und Unterschätzen zeitlicher Umfänge oder Körperwinkel, sprechen in jedem Falle für die automatische Erfassung solcher Daten auf sicheren Wegen (z: B. über die 3-D-Bewegungsanalyse).

Bei geschickter Anbringung der LED's können mit dem Extrac-System alle relevanten Körperwinkel bestimmt werden. Über die entwickelte Software werden somit automatische Haltungsanalysen möglich. Die Genauigkeit übersteigt das für die Interpretation bisher übliche Maß, so dass die beschriebenen methodischen Ungenauigkeiten zwar zu bedenken sind sich aber auf die Ergebnisse nicht nachteilig auswirken. Günstig gegenüber anderen Haltungsanalysen ist dabei die nicht erforderliche a priori Entscheidung für eine Klasse im Moment der Dokumentation, wodurch das Ergebnis verfälscht werden kann. Neben der schwierigen Einteilung von Klassen (Anzahl, Grenzen, etc.) nach Größe und Umfang ist der Entscheidungsprozess für den Beobachter ein das Ergebnis beeinflussender Faktor.



Als grundsätzlicher Vorteil der Bewegungsanalyse gegenüber allen beurteilenden Verfahren ist die objektive, also vom Arbeitsplatzbeobachter unabhängige Datenerfassung zu nennen. Die Auswertesoftware liefert, basierend auf den ermittelten 3-D-Raumkoordinaten, die Winkelgrößen, ihren zeitlichen Umfang und die Geschwindigkeiten in den jeweiligen Punkten. Die Bewegungssumme gibt Auskunft über den Bewegungsumfang, die absolute Geschwindigkeit lässt Rückschlüsse auf die Belastung zu, und die Verteilung der Geschwindigkeiten beschreibt den statischen und dynamischen Anteil der Arbeitsaufgabe.

Die festgestellten Unterschiede bezüglich der Körperhaltung auf den beiden Sitzplätzen blieben bei einer OWAS-Analyse unentdeckt. Für das Stechen von Spargel ergibt sich hier, sowohl im Stehen als auch im Sitzen, die Zuordnung zur Maßnahmenklasse zwei, die sich als belastende Körperhaltung definiert und Verbesserungsmaßnahmen erforderlich macht. Weder eine Favorisierung einer Körperhaltung noch einer Sitzplatzvariante wäre damit zu begründen.

Der Einfluss von personen- und produktspezifischen Merkmalen auf den Arbeitsablauf ist im voraus besonders in der Landwirtschaft und im Gartenbau schwer zu bewerten. Die reale Arbeitssituation kann von der geplanten abweichen. Variationen in der Arbeitsausführung erschweren die Anwendung herkömmlicher Methoden.

## 6.2 Informationsgewinn

Die Bewegungsanalyse ist in der Lage, in einem Arbeitsgang eine Vielzahl von Informationen zu gewinnen, die mit bisher angewandten Methoden nur durch Verknüpfung von mehreren Verfahren und nicht in derselben Genauigkeit vorliegen würden.

Die eben genannte Variabilität den Arbeitsablauf betreffende Parameter kennzeichnet die gartenbauliche Arbeitsgestaltung. Sie erfordert eine gute Einweisung der Arbeitskräfte und deren Eigeninitiative, auf die sich ändernden Umweltbedingungen richtig zu reagieren. Zur Beschreibung und Steuerung des Realprozesses ist neben den aufgezeigten quantitativen Aspekten menschlicher Arbeit auch die

qualitative Seite zu berücksichtigen. Das Gesamtarbeitsvolumen setzt sich aus unterschiedlichen Tätigkeiten mit verschiedenen Anforderungen an die Arbeitskraft zusammen, denen entsprechende Qualifikationen gegenüber stehen müssen.

Als wesentliche Vergleichsgröße zweier Gestaltungsvarianten dient im Rahmen der Bewegungsanalyse die Bewegungssumme, d.h. die Summe aller Teilstrecken zwischen den Messpunkten. Die Genauigkeit ist im Rahmen der digitalen Messungen sehr hoch. Sie ist abhängig von der apparativen Genauigkeit, auf die im Kapitel 4.3 eingegangen wurde, und vom Umfang der notwendigen Interpolation bedingt durch fehlende Messwerte. Aus den aufgezeichneten 3-D-Raumkoordinaten werden die Strecken automatisch berechnet. Der mögliche Stichprobenumfang vergrößert sich mit der digitalen Technik erheblich. Da die Berechnung nicht mehr davon abhängig ist, dass die Bewegungslinien sichtbar sind, können sich beliebig viele Bewegungsabläufe überlagern. Je größer der Stichprobenumfang wird, desto besser kann eine statistische Absicherung gelingen. Ein Versuchsablauf ohne Pausen erhöht die Übertragbarkeit auf die Praxissituation. Die Bewegungssumme ist ein objektives Maß für den Aufwand des beobachteten Körperpunktes zur Ausführung einer bekannten Aufgabe. Theoretisch ist der Körperteil mit der höchsten Bewegungssumme leistungsbegrenzender Faktor und besitzt, als Ansatzpunkt für Verbesserungen im System, oberste Priorität.

Am Beispiel der Variation der Arbeitshöhen in Versuch 1 konnte gezeigt werden, dass eine verbesserte ergonomische Gestaltung die Belastung verringert und somit die Voraussetzung für höhere Leistungen schafft. Die Bewegungssummen waren bei optimaler Arbeitshöhe niedriger (Abbildung 14).

Über die Definition geeigneter Indikatoren lassen sich somit gestalterische Vorteile messen und monetär bewerten. Gerade monetär-quantifizierbare Daten liegen wiederum in Klein- und Mittelbetrieben nur in wenig differenzierter Form vor (Rühmann 1991).

Trotz gesicherter Erkenntnisse über die ergonomische Gestaltung von Steh- oder Sitzarbeitsplätzen ist immer wieder zu beobachten, dass sowohl in Gartenbaubetrieben als auch branchenübergreifend wesentliche Parameter nicht beachtet werden. Primäres Augenmerk ist auf die ergonomische Gestaltung der Arbeitsumge-

bung zu richten (Maintz 2001). Neben den technischen Gegebenheiten oder dem Tätigkeitsprofil müssen die Körpermaße der Zielpopulation bekannt sein. Die Körpermaße spezieller Berufsgruppen sind bislang jedoch nur vereinzelt gesammelt worden (Greil 2001).

Als Beispiel aus der gartenbaulichen Praxis sei die individuelle Regulierung der Arbeitshöhe an einem Fließband für mehrere Arbeitskräfte genannt. Zu niedrige Arbeitshöhen führen nachgewiesenermaßen zu übermäßigen Belastungen im Bereich der Lenden- oder Halswirbel und im ungünstigsten Fall zu Schmerzen in den belasteten Regionen (Stoffert 1990). Schmerzen wiederum reduzieren die Leistungsfähigkeit und können Langzeitschäden verursachen. Ziel einer guten Arbeitsplatzgestaltung ist die Vermeidung solcher zusätzlicher Belastungen. Das Zusammenwirken mehrerer negativer Faktoren, wie beispielsweise der aufgrund der Fließtätigkeit reduzierte Entscheidungs- und Verhaltensspielraum, die Gefahr der Monotonie und die auftretenden Schmerzen, gefährden die Leistungsbereitschaft der Arbeitskräfte erheblich. Durch Verminderung der Handlungsbereitschaft und der Reaktionsfähigkeit besteht eine erhöhte Unfallgefahr (Fauß 2003; Sochatzy 2003).

Da gute ergonomische Rahmenbedingungen das Leistungspotential positiv beeinflussen, ist es ein Fehler, die Ergonomie als eigenständiges Gestaltungskriterium zu betrachten (Röbke 1985). Sie ist als Bestandteil der Produkt- oder Maschinenentwicklung in den Gestaltungsprozess zu integrieren. Die Erfüllung ergonomischer Grundprinzipien ist notwendig, um in der Rohmert'schen Bewertungshierarchie die höchste Stufe zu erreichen. Die Eignung ausgewählter Indikatoren für eine ergonomische Bewertung wurde im Ergebnisteil der Arbeit ausführlich dargestellt.

Die Bewegung verschiedener Körperteile mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erfordert koordinatorische Leistungen oder zeigt motorische Defizite auf. Über die Bewegungslinien können Unterschiede sichtbar gemacht werden.

Bei körperlicher Arbeit steigt die Bewegungsgeschwindigkeit mit steigendem Abstand des Körperteils vom Körperstamm bzw. vom Drehpunkt, d.h. die Bewegungssumme der Hände ist größer als die der Elle und die der Elle wiederum größer als die der Schulter. Entsprechend verhalten sich die Bewegungsgeschwin-

digkeiten. Gleiches gilt für den Kopf, wenn man arbeitsbedingtes Rumpfbeugen beobachtet. Ein auftretender Geschwindigkeitsgradient zwischen Schulter und Kopf könnte somit als Belastungsindikator verwendet werden.

In den meisten Fällen wurden Bewegungssummen für die Hände ermittelt, da es sich bei dem Hauptteil der betrachteten Aufgaben um Bringen oder Fügen mit den Händen handelt. Die Hände sind somit in der Regel leistungsbegrenzender Faktor im System und sind im Falle von Rotationsbewegungen der Arme die vom Drehpunkt am weitesten entfernten Orte.

Das Ausmaß der Kopfbewegung hat sich als sehr aufschlussreich dargestellt, vorausgesetzt die Bewegungen bieten ein Mindestmass an Dynamik (siehe Kapitel 4.3).

Die Aufzeichnung der Handbewegungen unterliegt in der Regel dem größten Fehler, bedingt durch Sichtbarkeitsprobleme. Die große Beweglichkeit der Hände erschwert die Verfolgung der auf ihnen angebrachten Dioden bzw. erfordert im Idealfall den Einsatz von Systemen mit mehr als nur zwei aufzeichnenden Kameras. Mit Hilfe der Bewegungssumme können nun verschiedene Gestaltungsvarianten objektiv miteinander verglichen werden. Entsprechend dem einen Grundprinzip des Bewegungsstudiums sind die Varianten zu bevorzugen, die bei dem selben Ergebnis einen geringeren Bewegungsaufwand verursachen.

Die bisherigen Untersuchungen berücksichtigen keine ermüdungsbedingten Veränderungen der Bewegungen. Interessant ist bei komplexen Methodenvergleichen die Erfassung der personenspezifischen Beanspruchung, die sich in Form von Ermüdung äußern kann. Insbesondere die physische Ermüdung, die in nachlassender Muskelleistung und Störungen der peripheren Koordination sichtbar wird, kann nur in Bewegungsaufzeichnungen veranschaulicht werden (Rohmert & Rutenfranz 1983). Bei der Aufzeichnung gleichförmiger, wiederkehrender Bewegungen, die im Gartenbau häufig anzutreffen sind, können zunächst über Bewegungsanalysen die geometrischen Räume ermittelt werden, innerhalb derer ein optimierter Bewegungsablauf stattfinden sollte. Dank der digitalen Aufzeichnung kann eine, nur durch die Speicherkapazität begrenzte, beliebige Überlagerung der Spuren aufgenommen werden, so dass Aussagen über die Wiederholgenauigkeit getroffen werden können. In aufeinanderfolgenden Versuchsphasen lassen sich

die persönlichen Fertigkeiten von den ermüdungsbedingten Bewegungsveränderungen abgrenzen. Bei der Interpretation der Abweichungen ist darauf zu achten, ob diese personenspezifisch variieren. Funke (1989) verwendete die geringere Wiederholgenauigkeit als Beleg einer motorischen Auffälligkeit.

Positiv für die Bewegungsanalyse ist, dass die Untersuchungen die Arbeitskraft in ihrer Bewegung nicht behindern. Die Aufnahmen erfolgen bei optimalen Lichtverhältnissen. Der in der Zielsetzung formulierten möglichst geringen Einflussnahme der Methode auf die Ergebnisse wird somit Rechnung getragen. Offensichtlich liegt mit der Bewegungsanalyse ein sehr gutes und vielseitiges Messinstrument vor. Die Objektivität, Reliabilität und die inhaltliche sowie innere empirische Validität eines Messinstrumentes werden wesentlich durch die Standardisierbarkeit beeinflusst. Vorausgesetzt die Markerpositionen sind exakt beschrieben, dann ist die Güte der Messungen sehr hoch. Die Messergebnisse werden hauptsächlich durch Verhaltensvariationen der Versuchspersonen und systemische Faktoren beeinflusst. Die Unabhängigkeit der Auswertelgorithmen von der Versuchsdurchführung ermöglichen umfassende Gestaltungsansätze durch Wahl des aussagekräftigsten Indikators und spätere Veränderungsmöglichkeiten. Der vorhandene Bestand der Grunddaten, der Weg-Zeit-Verlauf der verfolgten Körperpunkte, kann in Anpassung an verschiedene Fragestellungen optimal ausgewertet werden.

Die Bewertung der mit Hilfe der Bewegungsanalyse ermittelten Körperhaltungen erfordert aufgrund der insgesamt schwierigen Problematik die Zusammenarbeit mit Arbeitsmedizinern. In der Interpretation werden die zuvor exakt ausgerechneten Körperwinkel auf Minima, Maxima und Bereiche reduziert, deren zeitliches Auftreten gewisse Aussagen ermöglicht.

Die Wirkung der verschiedenen Belastungsfaktoren auf den Muskel-Skelett-Apparat ist als komplexes mehrdimensionales Netzwerk zu betrachten. Der Nachweis der Ursachen von Muskel-Skelett-Erkrankungen ist schwer, was sich darin äußert, dass die Zahl der gemeldeten Berufserkrankungen sehr viel höher ist als die Zahl später gezahlter Renten. Die direkte Schlussfolgerung von Messwerten auf eine mögliche Gesundheitsschädigung ist nicht zulässig, man muss die gesamte Arbeitssituation berücksichtigen (Borowski 1981).

Die Wirkung schädigender Faktoren ist außerdem sehr personenspezifisch, unter anderem abhängig vom Trainingszustand, der Vorbelastung, der Konstitution und vom Geschlecht. Erst bei Einwirkung der Belastung über einen langen Zeitraum (bei der Anerkennung einer Berufskrankheit in der Regel nach 10jähriger Exposition) ist ein Schaden einer bestimmten Ursache zuzuordnen. Das frühzeitige Erkennen der Belastungsfaktoren bleibt daher im Rahmen der Prävention weiterhin sehr wichtig. Im Rahmen einer mehrdimensionalen Betrachtungsweise können die Schwere der Belastung beeinflussende Faktoren, wie z. B. die Zeitdauer einer eingenommenen Haltung sowie gleichzeitig auftretende zusätzliche Belastungen, mit Hilfe der Bewegungsanalyse automatisch aufgezeichnet werden.

Im Rahmen einer ergonomischen Bewertung stellen die Messwerte eine fundierte Grundlage zum Soll-Ist-Vergleich dar und erlauben eine tendenzielle Bewertung der Gesamtsituation sowie die Benennung von Risikofaktoren. Eine genaue quantitative Bewertung der Belastungssituation ist im Rahmen der Bewegungsanalyse nicht möglich, was jedoch nicht ein Mangel der Methode ist, sondern aus der Komplexität der Belastungs-Wirkungs-Mechanismen resultiert. Die Ermittlung von Bewegungsgrunddaten und Körperhaltungen kann in Verbindung mit weiteren geeigneten Messmethoden, z.B. über Elektromyographie, eine Bewertung der Belastungssituation verbessern (Aaras 1988; Rullmann 2003).

Die Möglichkeiten der plastischen Darstellung der Ergebnisse über grafische Funktionen der Auswertesoftware oder durch Einlesen der Ergebnisse in andere Datenverarbeitungsprogramme ist als besonders hilfreich zu bewerten. Für Beratungstätigkeiten müssen einfache Darstellungsmöglichkeiten vorliegen. Die verwendeten Winkelverlaufsdigramme lassen sich in kritischen Bereichen entsprechend farblich gestalten und zeigen dann das Gefahrenpotential bestimmter Körperhaltungen sofort auf. Das gilt sowohl für die zeitlichen Verlaufsdigramme als auch für die Winkel-Winkel-Diagramme, siehe 5.2.2. Die Problematik der extremen Körperhaltungen im Gartenbau und der mangelnden Beschreibung dieser in Regelwerken ermöglicht teilweise nur spekulative oder subjektiv begründete Bewertungen.

Das gemessene, notwendige Ausmaß an Bewegungen im Rahmen der Aufgabenerfüllung ermöglicht die Erstellung von Nutzerprofilen bzw. den Abgleich zwi-

schen anthropometrischen Vorgaben der Konstruktion und der späteren Nutzergruppe. Das sogenannte „human modeling“, welches in der modernen computergestützten Konstruktion (CAD) gerne für Komfortanalysen der Konstruktionsumgebung und in eingeschränktem Maße für die Bestimmung des Greifraumes genutzt wird, vermag bisher keine den realen menschlichen Handlungen entsprechende Bewegungsmodulation (Chaffin 2003) außerhalb der untersuchten Räume. Derzeit finden weltweite Bemühungen statt, die computergestützten Menschmodelle von diesem Mangel zu befreien und sie für einen breiteren Einsatz vorzubereiten (Delleman 2003).

Solange die Bewegungsmodulation nicht sicher gelingt und die Anschaffungskosten von Systemen mit der entsprechenden Kompetenz für kleine Unternehmen finanziell nicht tragbar sind, kann die Bewegungsanalyse auf dem aktuellen Stand der Technik, z.B. im Gartenbau im Sinne der proaktiven Ergonomie, erfolgreich eingesetzt werden. Gleichzeitig werden im Rahmen der Messungen Grunddaten menschlicher Bewegungsabläufe gesammelt, die für die Weiterentwicklung von virtuellen Arbeitskräften genutzt werden können, denn die Grundlage aller Simulationen sind Datenbasen menschlicher Bewegungen.

### 6.3 Ausblick

Nach umfangreicher Prüfung der Methode erscheint der Einsatz der Bewegungsanalyse in vielen Situationen im Gartenbau und in der Landwirtschaft sinnvoll. Im Verlauf der Entwicklung der Software konnten eine Vielzahl bewegungsbeschreibender Größen definiert werden.

Vor allem in der Entwicklungsphase von Mensch-Maschine-Systemen ist der Einsatz der Bewegungsanalyse wünschenswert. Prototypen können im Labor einfach getestet werden und ein Soll-Ist-Vergleich kann erfolgen. Die bewegungsanalytische Überprüfung repetitiver Aufgaben im Rahmen der Massenproduktion kann einen hohen Nutzen erbringen. Oft wird verkannt, dass die Auswirkungen eines unnötigen Arbeitsweges bei repetitiven Tätigkeiten einen Multiplikatoreffekt mit beträchtlichem wirtschaftlichem Ausmaß besitzen. Im Bereich der Massenproduk-

tion sind die Ausführungszeiten vieler Aufgaben so kurz, dass sie nur noch automatisch erfasst werden können.

Die Bestimmung von Greifräumen im Rahmen der Aufgabenausführung ist hierfür besonders geeignet. Das Einhalten von anthropometrisch festgelegten Greifräumen kann überprüft werden (Georg 1999; Ude 2002) um konstruktiv erforderliche extreme Bewegungen zu vermeiden (Choi 2003).

Der Einsatz des verwendeten Bewegungsanalysesystems ist besonders für ortsfeste Arbeitsplätze geeignet. Eine Erweiterung des Systems auf mehrere Kameras sowie die telemetrische Übertragung der Markersignale könnten einen umfangreicheren Einsatz ermöglichen und den auftretenden Sichtbarkeitsproblemen entgegenwirken. Die Simulation von Arbeiten auf fahrenden Geräten hat sich jedoch als gute Alternative zur nicht möglichen aktiven Verfolgung einer Arbeitskraft mit dem Meßsystem erwiesen. Sie ist der aktiven Verfolgung aus dem Grunde vorzuziehen, da es sich bei den Simulationen um standardisierte Bedingungen handelt und die Aufzeichnungen innerhalb des kalibrierten Raumes gewährleistet sind. Es kann eine unbegrenzte Anzahl von Wiederholungen durchgeführt werden.

Die Verknüpfung mehrerer Indikatoren in der Gesamtbewertung ist ein großer Vorteil, den die Methode bietet. Aus einem Datensatz werden mehrere Parameter gewonnen, z.B. die Zeitdauer, die Bewegungssumme, auftretende Körperwinkel und Bewegungsgeschwindigkeiten. Die aus den Raumkoordinaten errechneten Indikatoren unterliegen dann alle denselben Einflüssen. Da die äußeren Einflussfaktoren im Gartenbau bereits sehr groß sind, ist gerade hier eine Methode gefragt, die möglichst viele Parameter in einem Arbeitsgang erfasst.

Die untersuchten und recht allgemeinen Problemstellungen können zum Teil auf andere Bereiche übertragen werden. Die vorgestellte Analysesoftware ist auf allgemeinen arbeitswissenschaftlichen Grundlagen erarbeitet worden, so dass problemlos verschiedenartige Produktionsbereiche anderer Branchen betrachtet werden können.

Um langfristig Beweise zu erbringen, dass bestimmte Körperhaltungen gesundheitsschädlich sind, bedarf es weiterer Untersuchungen der besonderen, im Pro-



duktionsgartenbau auftretenden, Bewegungsmuster. Derzeit verfügbare Regelwerke reichen nicht aus, um beispielsweise dynamisches Arbeiten im Sitzen oder Liegen zu bewerten. Die Bewegungsanalyse ist in der Lage, fehlende Grundkenntnisse zu erbringen, um diese in Zusammenarbeit mit der Medizin zu interpretieren.

Weitere Untersuchungen sollten der Frage nach der Definition von Bewegungen dienen, und inwieweit diese Größe als Bewertungskriterium verwendet werden kann. Ein Messinstrument für die objektive Bewertung von Fertigkeiten bei der Erledigung von bestimmten Aufgaben wäre eine interessante Neuerung.

Eine weiteres erfolgreiches Anwendungsgebiet für die Bewegungsanalyse könnte die Überprüfung von Displaysicherheit und die Durchführung von Fehlerrisikoanalysen in den zunehmend automatisierten Produktionsanlagen sein.

Eine Bewegungsanalyse im realen Arbeitsprozesse erbringt grundlegende Ergebnisse zu den auftretenden Bewegungsmustern. Durch Befragung kann das Komfortempfinden in verschiedenen Situationen ermittelt werden. Die Rahmenbedingungen gartenbaulicher Produktionsstrukturen sehen allerdings derartige Fragestellungen noch nicht vor. Im Produktionsprozess steht die kostengünstige Arbeitsausführung im Vordergrund. Um dennoch präventiv ergonomisch zu wirken, wäre die Weiterentwicklung des Systems in Richtung eines Arbeits- und Ergonomietrainers denkbar. Im Bewegungsprozess muss die Arbeitskraft ein Feedback über seine erbrachte Leistung, die Bewegungseffizienz und die Körperhaltung erhalten, um diese im positiven Falle beizubehalten oder aber zu verändern. Die Kenntnis über spezielle Fähigkeiten oder den aktuellen Leistungsstand einer Arbeitskraft ermöglichen zudem ihren optimalen Einsatz im Produktionsablauf.

## 6.4 Fazit

Nachdem die Problematik der Arbeitsgestaltung im Gartenbau dargestellt wurde, besteht weiterhin die Forderung nach einem Instrument, welches den Optimierungsprozess im Gartenbau vorantreibt, und das einfach und kostengünstig für die Verbesserung der Arbeitsbedingungen eingesetzt werden kann. Die Forderung nach definierter Qualität bei den Erzeugnissen muss auf die innerhalb der Produktion herrschenden Arbeitsbedingungen ausgedehnt werden. Nur eine umfangreiche Analyse bestehender Arbeitssituationen und die Publikation der Ergebnisse kann das Bewusstsein von Betriebsleitern und anderen ausführenden Organen schärfen und das bestehende Wertesystem im Gartenbau verändern.

Erfolgreiche technische Weiterentwicklungen erfolgen nur, wenn zwischen der bestehenden Wirklichkeit und dem gestaltungsrelevanten Wertsystem eine Discrepanz besteht (Baum 1986). Die Technikentwicklung benötigt Impulse. Sie muss, sofern die kostengünstige Produktion die Hauptanforderung ist, die Kostenreduzierung ermöglichen, um erfolgreich in neue beständige Organisationsformen eingeführt zu werden. Da der Beweis für höhere Leistungen in den dargestellten Versuchen an mehreren Stellen erbracht wurde, besteht eine reale Chance, das neue bewegungsanalytische Instrument bereits heute in den Gestaltungsprozess zu integrieren, in dem noch die Wirtschaftlichkeit der Produktion allen anderen Kriterien vorangestellt wird.

## 7 Zusammenfassung

Arbeitsplätze im Gartenbau sind trotz fortschreitender Mechanisierung durch einen hohen Anteil an Handarbeit gekennzeichnet. Die aktuellen Rahmenbedingungen im Gartenbau erfordern für die Zukunft einen effizienteren Einsatz des Faktors Arbeit in wirtschaftlichen und an Attraktivität gewinnenden Arbeitssystemen. Die Entwicklung solcher Systeme erfordert ein Verfahren zur objektiven Bewertung vorhandener und neuer Betriebs- und Arbeitsabläufe.

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Weiterentwicklung eines auf der Verfolgung von Infrarot-Leuchtdioden basierenden 3-D-Bewegungsanalysesystems. Dazu wurde das Kamerasystem der Firma Wente/Thiedig um eine vom System unabhängige Software zur arbeitswissenschaftlichen Auswertung der Bewegungsdaten erweitert. Die Gestaltung der Software erfolgte unter Berücksichtigung der aktuellen Problemfelder im Produktionsgartenbau. Die über die Indikatoren mögliche Bewertung der Bewegungslinien basiert auf den aufgezeichneten 3-D-Raumkoordinaten.

Aus den aufgezeichneten Datensätzen werden quantitative Messgrößen, z.B. die Zeitdauer, die Bewegungssumme, Bewegungsgeschwindigkeiten und auftretende Körperwinkel sowie qualitative Bewertungskriterien ermittelt. Grafische Funktionen innerhalb der Software dienen dem besseren Verständnis und der übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse. Die grafischen Funktionen umfassen z.B. die dreidimensionale Abbildung der Bewegungslinien sowie die Darstellung des Arbeitsbereiches und der Winkelgrößen in die Häufigkeit repräsentierenden Graustufen.

Die für die Bewertung herangezogenen Indikatoren werden ausführlich beschrieben und im Ergebnisteil auf ihre Eignung überprüft. Es werden sowohl wirtschaftliche als auch menschliche Ansprüche berücksichtigt. Aufgrund der digitalen Aufzeichnung der Bewegungen erhöht sich die Aussagekraft durch einen größeren Stichprobenumfang und eine höhere Messgenauigkeit erheblich. Der auf einer Messung basierende Interpretationsumfang steigt aufgrund der Vielzahl anwendbarer Indikatoren gegenüber anderen Methoden stark an.

Die aus den Bewegungsdaten errechneten Indikatoren unterliegen alle denselben Einflüssen. Da die äußeren Einflussfaktoren im Gartenbau bereits sehr groß sind, ist gerade hier eine Methode gefragt, die möglichst viele Vergleichsparameter in einem Arbeitsgang erfasst.

Um die Aussagekraft und den Erkenntnisgewinn aus den softwareseitig ermittelten Indikatoren zu überprüfen, wurden Anwendungsversuche mit verschiedenen Fragestellungen durchgeführt, die im zweiten Teil der Arbeit beschrieben werden.

Am Beispiel der Produktauflage auf ein Förderband werden die Einflüsse spezifischer Gestaltungsparameter auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems verdeutlicht. Die Veränderung der Bandgeschwindigkeit wirkte sich stark auf die erzielten Leistungen aus. Ein schnell laufendes Band verursachte bei einer Versuchsperson eine Verschiebung des Arbeitsbereiches in Förderrichtung. Bei ungünstiger Produktbereitstellung wurden deutlich höhere Bewegungssummen gemessen, die Leistung konnte über gesteigerte Bewegungsgeschwindigkeiten beibehalten werden.

In einem weiteren Versuch werden zwei Sitzplätze auf Spargelerntehilfen über die Bewegungsanalyse miteinander verglichen. Mehrere Indikatoren belegen die Vorteile des mit Kniepolstern ausgestatteten Sitzplatzes. Die Bewegungssummen auf dem Kniesitz waren niedriger, Winkelverläufe kongruent, und eine aufrechte Sitzhaltung war eher gewährleistet. Somit ermöglichen die Indikatoren eine objektive Bewertung der beiden Systeme bezüglich wirtschaftlicher und ergonomischer Kriterien.

Die Ergebnisse der beiden Versuche zeigen, dass es gelungen ist, zahlreiche relevante Indikatoren für den Vergleich der aufgezeichneten Bewegungen zu bilden. Der Nutzer gewinnt aus den Bewegungsdaten Informationen, die eine objektive Entscheidungsfindung ermöglichen.

Über die Bewegungsanalyse können somit in einem Arbeitsgang eine Vielzahl von Informationen gewonnen werden, die mit bisher angewandten Methoden nur durch Verknüpfung von mehreren Verfahren und nicht in derselben Genauigkeit vorgelegen hätten.

Als besonders wertvoll ist der Erkenntnisgewinn bezüglich einer menschengerechten Arbeitsplatzgestaltung zu bewerten, um für die Weiterentwicklung gartenbaulicher Arbeitssysteme neben der Wirtschaftlichkeit andere Entscheidungskriterien zu fördern.

## 8 Summary

Despite the fast technical progress modern horticultural work places still require a lot of manual work. The current development in the horticultural sector demands a more efficient implementation of manpower and an increasing attractiveness of simple manual tasks for the future. The design of such systems demands a method to objectively evaluate present and new work systems.

This thesis describes a largely improved 3-D-motion analysis system based on the tracking of infrared light diodes. The camera system manufactured by Wente/Thiedig is extended by a newly developed independent software to evaluate the motion data according to work scientific requirements. The development of the software was focused on current problems concerning horticultural production. It allows to calculate objective measures of comparison based on the 3-D-room coordinates describing the motions.

From the recorded motion data quantitative parameters like duration, the speed of motion, the sum of motion or angles describing the posture are calculated. In addition to that, qualitative parameters can be used for further evaluation. Several graphical functions within the new software facilitate the understanding of the motion data and allow a clear presentation of the results. A 3-D-image of the motion track, the area of activity or the angular dimensions in different shades of gray representing the frequency of occurrence are selected examples of the graphical functions.

The available objective measures of comparison are described in detail in chapter four. In the experiments they are reviewed for their suitability. Economic and ergonomic demands are considered. The digital recording of the motion data (ASCII-format) allows a large sample size and consequential an excellent basis for statistics. Accuracy and explanatory power as well as the level of confidence are increased. The wide range of descriptive parameters gained in one experiment allows a better data interpretation compared to other methods.

A large variation in the framework of horticultural production, for example the yield, the size and distribution of the products or the weather conditions, demands a method that collects a lot of information underlying the same influences.

To proof their suitability and the increase of information gained with the measures of comparison practical experiments were carried out. These are described in the fifth chapter of this thesis.

A workstation for placing products on a conveyor belt is varied to show the influence of design parameters on the operating efficiency. The speed of the conveyor movement strongly affected the output. An increase of the speed can cause an incremental shift of the area of motion in the direction of flow, as it was noticed for one out of three test persons. The unfavorable product supply lead to higher sums of motion, whereas the output was kept at the same level.

In another experiment two seat constructions built for asparagus harvesting aids are compared by motion analysis. Several measure of comparison suggest to favor the seat with knee pads. The sum of motion was lower on this seat, the course of the trunk angles was congruent and an upright sitting position is more likely. Therefore the combination of quantitative and qualitative parameters allows an objective evaluation of a system looking at economic and ergonomic criteria.

The results from all practical experiments show that relevant measures of comparison were defined to successfully compare the motion data. The user of the newly developed analyzing program gains valuable information to make a truly impartial decision.

The motion analysis systems enables scientists to gather a multitude of information out of one experiment, which formerly required a combination of several methods. The accuracy of the results is also increased.

A more of information to rate human factors is notably valuable, encouraging the development of horticultural work systems towards incorporating economic and ergonomic criteria.

## Quellenverzeichnis

### Literaturquellen

- AARAS A., WESTGAARD R. H., STRANDEN E., 1988, *Postural angles as an indicator of postural load and muscular injury in occupational work situations*, ergonomics, vol. 31, no. 6, S. 915-933
- AGHAZADEH F., 1988, Trends in Ergonomics/ Human Factors V. North Holland, S. 387-394
- ALEXANDER T., 2002, *Die zielgerichtete Armbewegung unter informatorischer Belastung. Dissertation.* Wuppertal
- AUNE I. A., JÜRGENS H. W., 1989, *Computermodelle des menschlichen Körpers*, Auftragsstudie für das Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Bericht Nr. 27, Kiel
- BARON S., ESTILL C. F., STEEGE A., LALICH N., 2001, *Simple solutions: Ergonomics for farm workers*, U.S. Department of Health and Human Services, NIOSH
- BAUM E., 1980, Motografie I – Bewegungsaufzeichnung mit Spuren – Literaturecherche, Infrarot-Kleinbild-Technik, Bremerhaven: Verlag neue Wissenschaft GmbH
- BAUM E., 1983, Motografie II. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Bd. Fb 324, Bremerhaven: Verlag neue Wissenschaft GmbH
- BAUM E., 1986, Motografie III. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Bd. Fb 468, Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH
- BERNSTEIN N. A., 1927, *Die kymocyclographische Methode der Bewegungsuntersuchung*. In: Abderhalden E (Hrsg) Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden - unter Mitarbeit von zahlreichen Fachgenossen, Bd 5, Urban und Schwarzenberg Berlin, S.32-36
- BERNSTEIN N. A., 1930, *Analyse der Körperbewegungen und Stellungen im Raum mittels Spiegel-Stereoaufnahmen* In: Abderhalden E (Hrsg) Handbuch der biolog. Arbeitsmethoden - unter Mitarbeit von zahlreichen Fachgenossen, Bd 3, Urban und Schwarzenberg Berlin, S. 87-95
- BOKRANZ R., LANDAU K., 1991, *Einführung in die Arbeitswissenschaft*, UTB Band 1619, Eugen Ulmer Stuttgart
- BOROWSKI B., 1981, *Einseitige Körperhaltung am Arbeitsplatz*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Forschungsbericht Nr. 289, Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH
- BRUDER R., 1993, *Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur belastungsanalytisch unterscheidbaren Erholungszeit*. Forschungsberichte VDI, Reihe 20, Nr. 93, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH
- BUBB, H., 2003, *Research for a strength based discomfort model of posture and movement*. Proceedings of the XVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Seoul, Korea.



- BURKHARDT T. H., O'BRIEN M., 1979. *Human Considerations in Mechanizing Fruit and Vegetable Grading*, Transactions of the ASAE 1979
- BURZIK A., KNUTH H., 1981. *Untersuchungen zum Inhalt und zu den Bedingungen der Arbeit in Gewächshausanlagen – ein Beitrag zur wissenschaftlichen Arbeitsorganisation*, Dissertation Humboldt-Universität Berlin
- BUSH-JOSEPH C., SCHIPPLEIN O., ANDERSSON G. B. J., ANDRIACCHI T. P., 1988, *Influence of dynamic factors on the lumbar spine moment in lifting*, Ergonomics, vol. 31, no. 2, S. 211-216
- CALISTO C., 1999, *Ergonomic investigations in fruit growing*, Dissertation Universität Hohenheim, Verlag Grauer, Stuttgart
- CHAFFIN D. B., 2003, *Improving Human modeling for proactive ergonomics in design*. Proceedings of the XVth International Ergonomics Association, Seoul, Korea.
- CHOI, H.J., 2003, *A performance based model of normal working area*, Proceedings of the XVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Seoul, Korea.
- DATTA ET AL, 2001, *The Use of Electromagnetic Motion Tracking Analysis to Objectively Measure Open Surgical Skill in the Laboratory-Based Model*. Journal of the American College of Surgeons, Vol. 193, No. 5, pp. 479-485
- DELLEMAN, N., 1990, *VICON – Rechnerunterstützte Bewegungsanalyse am Arbeitsplatz*. IAO-Forum Rechnerunterstützte Arbeitsplatzgestaltung
- DELLEMAN, N. ET AL, 2003, *Advances in predicting motor behaviour, comfort and performance for digital human models*. Proceedings of the XVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Seoul, Korea
- ELIAS H.-J., GOTTSCHALK B., STAEHLE W. H., 1985, *Gestaltung und Bewertung von Arbeitssystemen*. Frankfurt/Main, New York: Campus Verlag
- ELLEGAST R.-P., 1998, *Personengebundenen Meßsystem zur automatisierten Erfassung von Wirbelsäulenbelastungen bei beruflichen Tätigkeiten*, BIA-Bericht 5/98, Sankt-Augustin: Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG)
- FAUß G., 05/2003, *Stress: Ursache für Fehler, Krankheit und Unfälle*, Arbeit und Gesundheit spezial, S. 18/19
- FUNKE R., 1989, *Untersuchung zur Feinmotorik gesunder Kinder und von Kindern mit leichten Hirnfunktionsstörungen*, Dissertation Universität Giessen
- GARG A., BANAAG J., 1988, *Maximum acceptable weights, heart rates and RPEs for one hour's repetitive asymmetric lifting*, Ergonomics, vol. 31, no. 1, S. 77-96
- GEORG H., OBERDELLMANN P., 1999, *Online-Motografie zur Bewegungsanalyse von Fressvorgängen bei Milchkühen*. Landtechnik 54: S. 344-345
- GRANDJEAN E., 1991, *Physiologische Arbeitsgestaltung, Leitfaden der Ergonomie*. 4. Auflage, Landsberg: ecomed Verlagsgesellschaft mbH

- GREIL H., SCHEFFLER CH., 2001, *Mensch-Technik-Umwelt, Forschungsforum Anthropologie*. Potsdam: Schriftenreihe des Zentrums für Umweltwissenschaften der Universität Potsdam
- GRÖGER V., SCHWERES M., 2002, *Dokumentation und Bewertung von Arbeitsbedingungen in der Landwirtschaft – Möglichkeiten des computergestützten Verfahrens GRIP (Ganzheitliches Rechnungsverfahren zur Investitionsplanung)*. Landbauforschung Völkenrode – FAL. Sonderheft 243: 53-62.
- GUGGENBÜHL U., KRÜGER H., 1987, *Bewegungsanalyse an verschiedenen industriellen Arbeitsplätzen*. Sozial- und Präventivmedizin 32: 266-268
- HASLEGRAVE M., WILSON J. R., CORLETT E. N., MANENICA I., 1990, *Work Design in Practice*. Taylor & Francis
- HETTINGER T., 1991, *Handhabung von Lasten, Ergonomische Gesichtspunkte*. REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V., München: Hanser
- HETTINGER, MÜLLER, GEBHARDT, 1989, *Ermittlung des Arbeitsenergieumsatzes bei dynamisch-muskulärer Arbeit*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Bd. Fa 22, Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH
- HETTINGER, WOBBE, 1993, *Kompodium der Arbeitswissenschaft, Optimierungsmöglichkeiten zur Arbeitsgestaltung und Arbeitsorganisation*. Ludwigshafen: Kiehl
- HOELAND K., MEINE M., HEXAMER M., WERNER J., 1998, *Dreidimensionale Bewegungsanalyse mit Aktivitätssensoren für die Schrittmachertherapie*, Biomedizinische Technik, Band 43, Ergänzungsband 1, S. 368-369
- HUANG J., ONO Y., SHIBATA E., TAKEUCHI Y., HISANGA N., 1988, *Occupational musculoskeletal disorders in lunch centre workers*, Ergonomics, vol. 31, no. 1, S. 65-75
- JAKOB M., GEYER M., 2003, *Zur Gestaltung von Fließbandarbeitsplätzen*, Landtechnik, Heft 3
- JAKOB M., GEYER M., 2004, *Gestaltung der manuellen Auflage von Gartenbauprodukten auf Förderbänder mit Hilfe der dreidimensionalen Bewegungsanalyse*. Tagungsband AKAL Seminar, S. 169-175
- JÜRGENS, KOCH, BRAEMER, PERNACK, 1990, *Arbeitsbedingungen und Gesundheitszustand von Beschäftigten in der Landwirtschaft der DDR*, Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 4, S. 199-204
- KARWOWSKI, GENAIDY, ASFOUR, 1990, *Computer-Aided Ergonomics*. Taylor & Francis
- KIRCHNER J.-H., BAUM E., 1990, *Ergonomie für Konstrukteure und Arbeitsgestalter*. REFA Fachbuchreihe Betriebsorganisation, Neuauflage von Mensch-Maschine-Umwelt, München: Carl Hanser Verlag
- KLUTH K., BÖHLEMANN J., STRASSER H., 1994, *A system for a strain-oriented analysis of the layout of assembly workplaces*, Ergonomics vol. 37, No. 9, S. 1441-1448
- KOLLAND A., 1999, *Eine vergleichende Studie von Low-Back-Pain-Patienten nach Bandscheiben-*

- vorfall während der Rehabilitation mit einer gesunden Kontrollgruppe*, Dissertation an der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm
- KUPFER J., 1998, *Ermittlung und Beurteilung arbeitsbedingter Lastenhandhabung: Moderne Verfahren und Anwendungsbeispiele*. HRSG.: Hessisches Ministerium für Frauen, Arbeit und Fortschritte im Arbeitsschutz: Verhütung und Erkennung, Vortrag, Tagungsbericht
- LANGE W., 1991, *Kleine Ergonomische Datensammlung*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 6. Auflage, Köln: Verlag TÜV Rheinland GmbH
- LAURIG W, ROMBACH V, 1989, *Expert systems in ergonomics: requirements and an approach*. Ergonomics vol. 32, No. 7, S. 795-811
- LAURIG W., 1992, *Grundzüge der Ergonomie, Erkenntnisse und Prinzipien*. REFA Fachbuchreihe der Betriebsorganisation, 4. Auflage, Berlin, Köln: Beuth Verlag GmbH
- LAWACZECK M. ET AL., 2003, *Ergonomische Beurteilung von Montagetätigkeiten in der Automobilindustrie*, Zeitschrift der Arbeitswissenschaft 1, S. 35-41
- LOWE B. D., 2003, *Validity of observational posture analysis methods for the wrist and forearm*. Proceedings of the XVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association, Seoul, Korea.
- LUCZAK H., 1993, *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- LUGNÉ P. C. ET. AL., 1999, *Motion analysis of an articulated locomotion model by video and telemetric data*, Journal of Biomechanics 32, S. 977-981
- MAINTZ G., ULLSPERGER P., JUNGHANS G., 04.01.2001, *Psychische Arbeitsbelastung und Prävention von Muskel-Skelett-Erkrankungen*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- MAREY, E.-J, 1895, *Movement*. William Heinemann, London, S.74-92
- MAREY E.-J, 1899, *La chronophotographie appliqué à l'étude des actes musculaires dans la locomotion*. Interméd Biol Méd 2: 7-14
- MARRAS W. S, WONGSAM P.E, 1986, *Flexibility and velocity of the normal and impaired lumbar spine*. Arch Phys Med Rehabil 67: 213-217
- MATTILA M., KARWOWSKI W., 1992, *Computer Applications in Ergonomics, Occupational Safety and Health*. North Holland
- MESSERSCHMIDT U., 1993, *Ergonomische Analysen bei Pflanzmaschinen*, Diplomarbeit an der TU München, Institut für Landtechnik Freising-Weihenstephan, Fachgebiet Technik im Gartenbau, Prof. Dr. Meyer
- MUYBRIDGE E., 1979, *Animal locomotion. An electro-photographic investigation of consecutive phases of animal movements*. 11. University of Philadelphia (1887), Nachdruck Dover, New York, S.34-53
- REFA, 1984, , *Methodenlehre des Arbeitsstudiums, Teil 1-3*. 7. Auflage, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation, München: Carl Hanser Verlag

- 
- REID C. J., 1985, *Computer simulation of reach zones for the agricultural driver*. Proceedings of the 9<sup>th</sup> Congress of the International Ergonomics Association, Bournemouth, England
- REINISCH M., 1993, *Bewegungsanalyse und Druckverteilung im Sportschuh – Laufbandmessung versus Feldversuch*. Dissertation, München
- ROHLFING H-R., 2001, *In der Industrie läuft das ganz anders*. TASPO Magazin 3: S. 4-7
- ROHMERT W., LANDAU K., 1979, *Das Arbeitswissenschaftliche Erhebungsverfahren zur Tätigkeitsanalyse*. Bern, Stuttgart, Wien: Verlag Hans Huber
- ROHMERT W., RUTENFRANZ J., 1983, *Praktische Arbeitsphysiologie*. 3. Auflage, Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag
- RÖBKE R., 1985, *Beispiele ergonomischer Arbeits- und Produktgestaltung*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Bd. S 17, Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH
- RÜHMANN H., 1991, *Umsetzung arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse in die Praxis*. Dokumentation Arbeitswissenschaft, Bd. 29, Köln: Schmidt
- RULLMANN M., 31.03.2003, *Elektromyographische Untersuchung der liegenden Arbeitshaltung bei der manuellen Ernte von Einlegegurken*. Diplomarbeit an der Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Fachgebiet Verfahrenstechnik für Intensivkulturen, Prof. Kleisinger
- SÄMANN W., 1970, *Charakteristische Merkmale und Auswirkungen ungünstiger Arbeitshaltungen*. Schriftenreihe „Arbeitswissenschaft und Praxis“, Band 17, Beuth-Verlag, Berlin
- SCHILDGE B., 1995, *Ergonomische Beurteilung des Arbeitens in kniender Körperstellung*. Dissertation, Darmstadt
- SCHMIDTKE H., 1993, *Ergonomie*. 3.Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag
- SCHMIDTKE H. ET.AL., Stand 2002, *Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden*, Band 1. 2. Auflage, Koblenz: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB)
- SCHMIDTKE H. ET.AL., Stand 2002, *Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden*, Band 5. 2. Auflage, Koblenz: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (BWB)
- SCHNAUBER H., ZERLETT G., 1984, *Beanspruchungsmeßmethoden*. Praxis der Ergonomie, Köln: Verlag TÜV Rheinland
- SCHREIBER T., 1998, *Bestimmung von Haltung, Beweglichkeit und Bewegungskoordination durch 3-D-Bewegungsanalyse*. 7. Interdisziplinärer Wirbelsäulenkongress, Jena
- SCHWEINGRUBER J., 1996, *Beitrag zur Vorhersage des Bewegungsverhaltens von Operateuren an Sitzarbeitsplätzen*. Dissertation, Wuppertal
- SOCHATZY M., 2003, *Anschaulicher Stress*, Arbeit und Gesundheit Spezial 05/2003, Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz

- SPITZER H., HETTINGER T., KAMINSKI G., 1982, *Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit*. 6. Auflage, Berlin, Köln: Beuth Verlag GmbH
- STALLKAMP F., 1998, *Dreidimensionale Bewegungsanalyse und elektromyographische Untersuchung beim Inline-Skating unter Berücksichtigung eines Weichschalen- und eines Hartschalenschuhs*. Dissertation an der Universität Münster
- STEINBERG U., WINDBERG H.-J., 1995, *Leitfaden-Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der manuellen Handhabung von Lasten*. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Sonder-schrift 9, 2. Auflage, Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH
- STOCKEY F., 1979, *Arbeitsplanung und Arbeitsgestaltung im Produktionsgartenbau*. Betriebs- und Marktwirtschaft im Gartenbau, Heft 7, Berlin, Hamburg: Verlag Paul Parey
- STOFFERT G., 1967, *Der Vergleich von Arbeitsverfahren und Kulturverfahren im Erwerbsgartenbau*, Berlin und Hamburg, Paul Parey
- STOFFERT G., ROHLFING H.-R., 1980, *Von der Planzeit bis zum Produktionsverfahren*. GbGw, Heft 35: S. 770-773
- STOFFERT G., ROHLFING H.-R., 1980, *Arbeitszeitbedarf zur Erzeugung von Topf-Chrysanthemen*. GbGw, Heft 35: S. 773-776
- STOFFERT G., ROHLFING H.-R., 1980, *Töpfe mit Pflanzen vom Förderband ausstellen*. GbGw, Heft 35: S. 785 - 787
- STOFFERT G., ROHLFING H.-R., 1980, *Eriken in Bodenlöcher einbringen*. GbGw, Heft 35: S. 762-763
- STOFFERT G., 1985, *Analyse und Einstufung von Körperhaltung bei der Arbeit nach der OWAS-Methode*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaften 39: 31-38
- STOFFERT G., 1990, *Arbeiten im stark gebeugten Stehen*. GbGw, Heft 32: S. 1565-1567
- STOFFERT G., 1990, *Arbeitshöhe und statische Belastung*. GbGw, Heft 32: S. 1562-1564
- STOFFERT G., 1990, *Gärtnerhände am Boden*. GbGw, Heft 32: S.1568-1571
- STUDMAN C., 1998, *Ergonomics in Apple Sorting: A Pilot Study*. Journal of agricultural Engineering Research, 70: p. 323-334
- THOMAS J., 1995, *Computergestützte Methoden zur ergonomischen Untersuchung arbeitsintensiver Prozesse im Gartenbau*. In: 10. Arbeitswissenschaftliches Seminar am 23. und 24. Oktober 1995, Agrartechnische Berichte, Band 26: S. 209-222, Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim
- TIMME U., 1990, *Grundlagen zur Beurteilung der allgemeinen und geschlechts-spezifischen Beanspruchung durch Arbeit in gebückter Körperstellung*. Forschungsberichte zur Ökonomie im Gartenbau, Nr. 66, Hannover und Weihenstephan
- UDE, G., GEORG, H., 2002, *Tiergerechte Fressplatzgestaltung für Milchkühe in Laufställen*. Land-technik 57 (1):48-49

- VOS H. W., 1973, *Physical Workload in Different Body Postures, While Working Near to, or Below Ground Level*. Ergonomics, Vol. 16, No. 6: p. 817-828
- WEBER E. F., 1836, *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge - eine anatomische Untersuchung*. Dieterich, Göttingen
- WILDT U., 1988, *Belastung und Beanspruchung des Menschen bei gartenbaulichen Arbeiten und die hieraus resultierenden Erholungszeiten*. Forschungsberichte zur Ökonomie im Gartenbau, Nr. 65, Hannover und Weihenstephan

## 8.1 Internetquellen

- JÜRGENS W. W., MOHR D., SKORUPPA H., 1998, *Working Conditions and Occupational Health in German Agriculture*. Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Potsdam, im Internet unter: <http://bbosha.de/publications/vortraege/lublmap2/paper2.htm> (11/04/2003)
- MOHR D., 1998, *Evaluation of Physical Hazards at Workplaces in Agriculture*. Landesinstitut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Potsdam, im Internet unter: <http://bb.osha.de/publications/vortraege/lublmap1/paper1.htm> (11/04/2003)
- PEHAM CH., *Bewegungsanalyse unter standardisierten Bedingungen*, im Internet unter: <http://ortho.vu-wien.ac.at/arbeitsg/i111gait/projekte/palt.htm> (24/10/2000)
- OHNE AUTOR, *Putzen fest im Griff*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, im Internet unter: <http://www.zahnbuerstenergonomie.ethz.ch/index.html> (27/06/2003)
- OHNE AUTOR, *Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2001*. im Internet unter: <http://www.baua.de/info/statistik> (30/07/2003)
- OHNE AUTOR, *Nach dem Schleudertrauma Bewegungsanalyse am PC*, im Internet unter: <http://www.arzt-online.de/docs/1999/04/28/078a1305.asp>, (06.03.2003)

## 9 Anhang

### 9.1 Algorithmen zur Berechnung ausgewählter Indikatoren

#### 9.1.1 Interpolation von Bereichen mit nicht sichtbaren Punkten

Die Punkte zwischen i und j waren nicht sichtbar., Punkt j wurde später erreicht als Punkt i. Die Punkte sind durch die Koordinaten  $p(i)$  und  $p(j)$  sowie die Zeit  $t(i)$  und  $t(j)$  beschrieben (Abbildung).

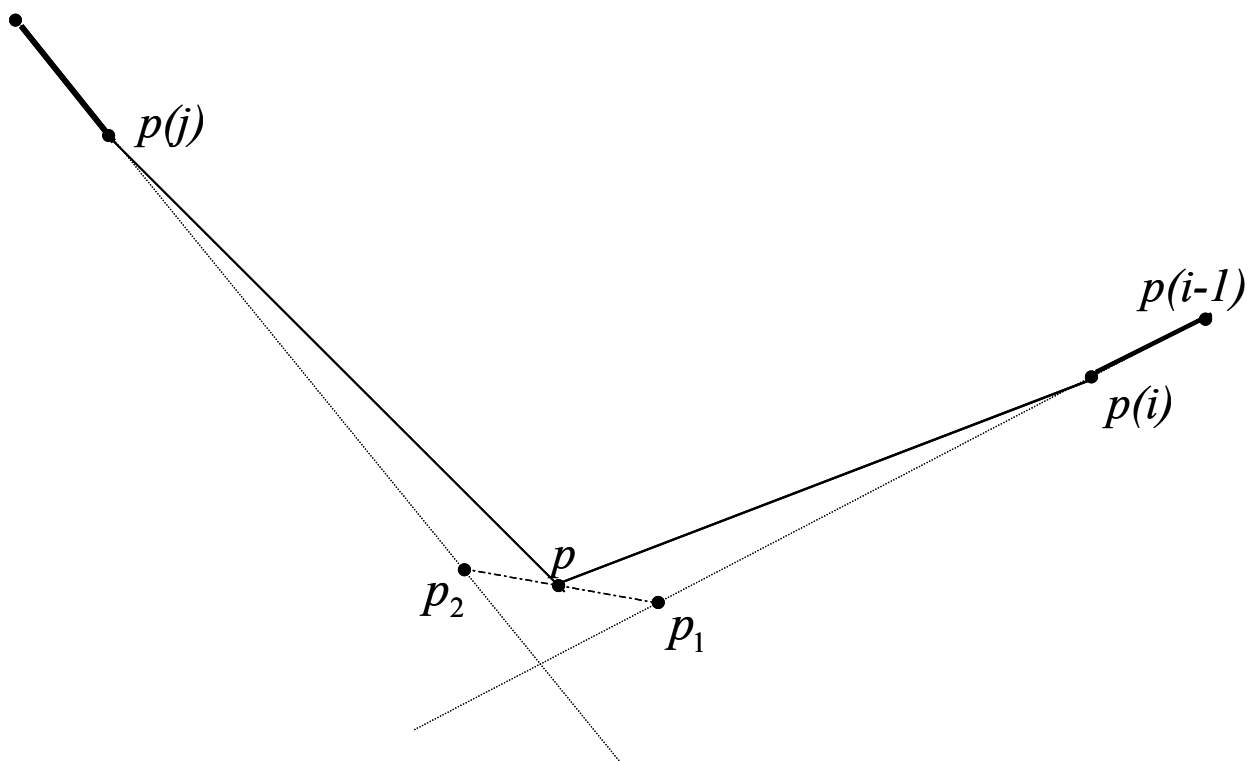


Abb. 35: Geschwindigkeitsabhängige Interpolation fehlender Messwerte

#### Geschwindigkeitsabhängige Interpolation („speed based approximation“)

Die Koordinate ( $p$ ) berechnet sich aus  $p = \frac{p_1 + p_2}{2}$ , wobei  $p_1$  als der Punkt angenommen wird, in dem sich die Leuchtdiode zum Zeitpunkt  $\frac{t(j) - t(i)}{2}$  befindet, vorausgesetzt sie bewegt sich in konstanter Geschwindigkeit zwischen den Punkten

$p(i)$  und  $p(i-1)$  und  $p_2$  bei ebenfalls konstanter Geschwindigkeit zwischen den Punkten  $p(j)$  und  $p(j+1)$ :

$$p_1 = p(i) + (p(i) - p(i-1)) \cdot \frac{j-i}{2}$$

$$p_2 = p(j) + (p(j) - p(j+1)) \cdot \frac{j-i}{2}$$

Zwischen dem errechneten Punkt  $p$   $[p(i), p]$  and  $[p, p(j)]$  werden Strecken gebildet, die sich als Näherung definieren.

### Direkte Verbindung („straight approximation“)

Die Punkte  $p(i)$  und  $p(j)$  (siehe Abb. 35) werden auf direktem Wege miteinander verbunden.

### 9.1.2 Bewegungssumme

$N$  sei die Anzahl der vorhandenen Punkte eines Kanals in der ASCII-Datei und die Vektoren,  $p_i, i = \overline{1, N}$ , die Koordinaten der Punkte, z.B.  $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ .

Die Bewegungssumme ( $d$ ) errechnet sich aus der Summe der Einzelstrecken zwischen den Punkten:

$$d = \sum_{i=1}^{N-1} |(p_i, p_{i+1})| \quad |(p_i, p_{i+1})| = \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2 + (z_i - z_{i+1})^2}$$

### 9.1.3 Winkelberechnung für drei ausgewählte Kanäle

Zur Winkelberechnung müssen drei Kanäle ausgewählt werden. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Kanäle  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  ausgewählt wurden. Die gesamte ASCII-Datei enthält  $n$  Kanäle.



### Berechnung der Winkel aus den Messwerten

Der Winkel  $\alpha_i$  berechnet sich wie in Abbildung 36 gezeigt, wobei  $p_i^k$  der erste Punkt im Kanal k ist: Für die Berechnung werden  $a_1$  und  $b_1$  verwendet, da sich  $p_i^{k1}$  und  $p_i^{k2}$  zum Aufzeichnungszeitpunkt von k3 bereits weiterbewegt haben.

$$a_i = p_i^{k1} + \frac{N-k1}{N}(p_{i+1}^{k1} - p_i^{k1}),$$

$$b_i = p_i^{k2} + \frac{N-k2}{N}(p_{i+1}^{k2} - p_i^{k2}).$$

Folglich ist der Winkel  $\alpha_i$  der Winkel zwischen den Sektoren  $[p_i^{k3}, b_i]$  und  $[b_i, a_i]$ .

### Berechnung des Winkels basierend auf den durchschnittlichen Längen zweier Segmente

In diesem Fall berechnet sich  $\alpha_i$  auf der Grundlage des Abstandes  $d_i = |p_i^{k3}, a_i|$  unter Anwendung der Regeln der Winkelberechnung und der Voraussetzung, dass die Strecken  $f = |p_i^{k1}, p_i^{k2}|$  und  $g = |p_i^{k2}, p_i^{k3}|$  für jeden Zeitpunkt konstant sind:

$$\alpha_i = \cos\left(\frac{f^2 + g^2 - d_i^2}{2 \cdot f \cdot g}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}.$$

In den Messungen können die Abstände  $|p_i^{k1}, p_i^{k2}|$  und  $|p_i^{k2}, p_i^{k3}|$  aus mehreren Gründen variieren. Um diesen Einfluss möglichst gering zu halten, werden die durchschnittlichen Abstände f und g ermittelt und wie folgt berechnet:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^M |p_i^{k1}, p_i^{k2}|}{M}, \quad g = \frac{\sum_{i=1}^M |p_i^{k2}, p_i^{k3}|}{M}$$

M ist die Anzahl der Werte in der ASCII-Datei.

In dem Fall dass  $f + g < a_i < f + g + 1cm$  wird ein Winkel von  $180^\circ$  angenommen, und wenn  $a_i > f + g + 1cm$  wird kein Winkel berechnet.

### Berechnete Winkel um zwei Segmente festgelegter Längen

Die Berechnung der Winkel erfolgt wie die unter 2, jedoch werden die Abstände  $f$  und  $g$  vom Nutzer festgelegt. Es ist somit ausreichend, zwei Kanäle ( $k1$  und  $k3$ ) für die Berechnung auszuwählen.

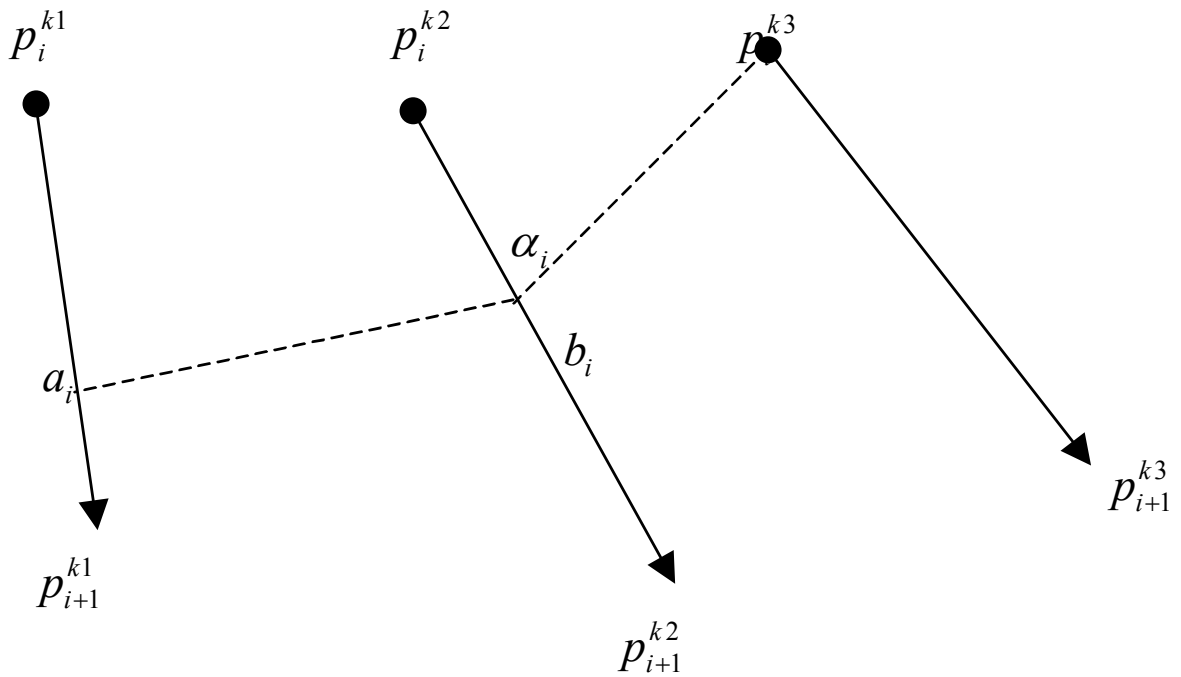


Abb. 36: Schematische Darstellung der Winkelberechnung um drei Kanäle

### 9.1.4 Bestimmung des Arbeitsbereiches

Unterteilt man den Arbeitsraum in Quader definierter Größe, so lässt sich die Dauer des Aufenthaltes jeder Diode in den entsprechenden Quadranten berechnen. Um sowohl die Darstellung als auch die Berechnung zu vereinfachen, wird eine Dimension als unendlich angenommen, so dass sich eine 2-D Berechnung und Darstellung ergibt.

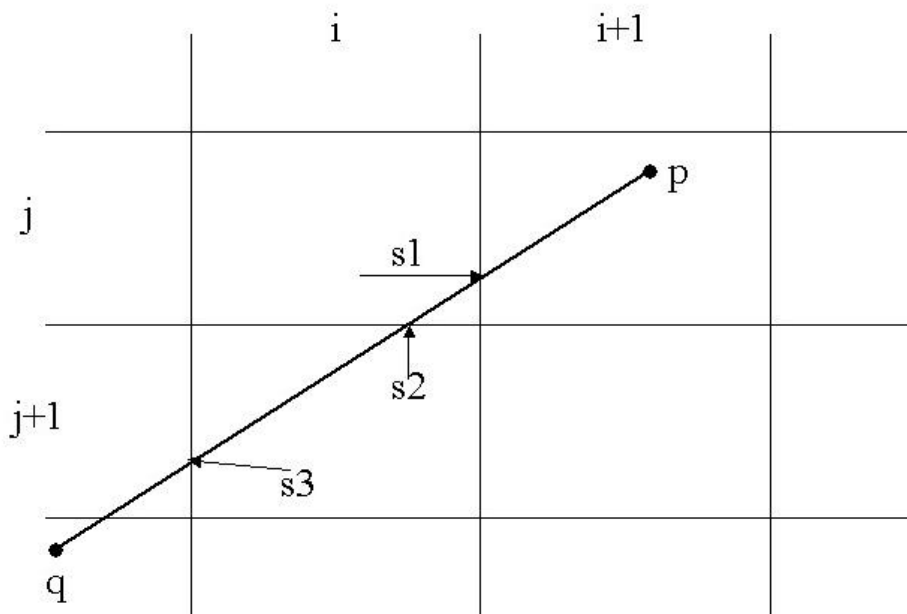


Abb. 37: Beispiel der räumlichen Zuordnung einer Strecke p,q

Die Berechnung für beliebige Strecken, wie z.B. [p,q] als Ausschnitt der Bewegungskurve erfolgt entsprechend der folgenden Algorithmen:

$$(i+1,j): \quad \frac{|(p,s1)|}{|(p,q)|} * (t(q) - t(p))$$

$$(i,j): \quad \frac{|(s1,s2)|}{|(p,q)|} * (t(q) - t(p))$$

$$(i,j+1): \quad \frac{|(s2,s3)|}{|(p,q)|} * (t(q) - t(p))$$

### 9.1.5 Bezugsobjekt

Das Bezugsobjekt wird in den grafischen Darstellungen der Software als grüne Box dargestellt (siehe Abbildung 38). Vom ersten Koordinatentripel  $(0,0,0)$  der in der Arbeit als Eichmessung bezeichneten Messung werden drei zueinander rechtwinklige Strecken mit den Längen 100 cm, 40 cm und 10 cm gebildet, aus denen sich die Länge, Breite und Höhe des Bezugsobjektes ergibt.

Um die Software zu nutzen wird eine Eichdatei benötigt, durch die das gewünschte Bezugsobjekt abgebildet wird.

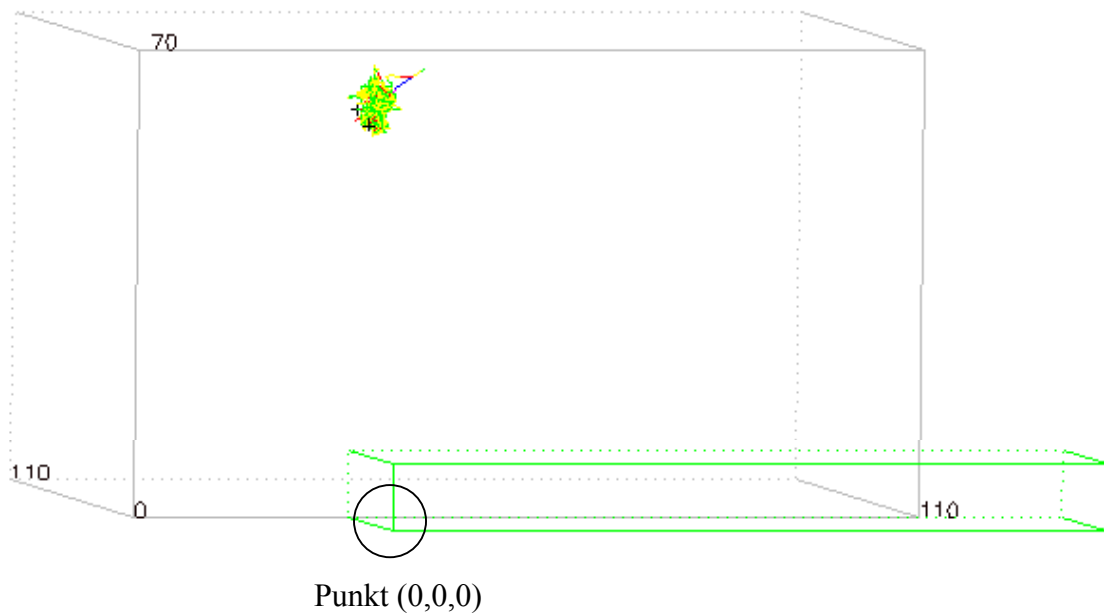


Abb. 38 : Bezugsobjekt ausgehend von Punkt  $(0,0,0)$

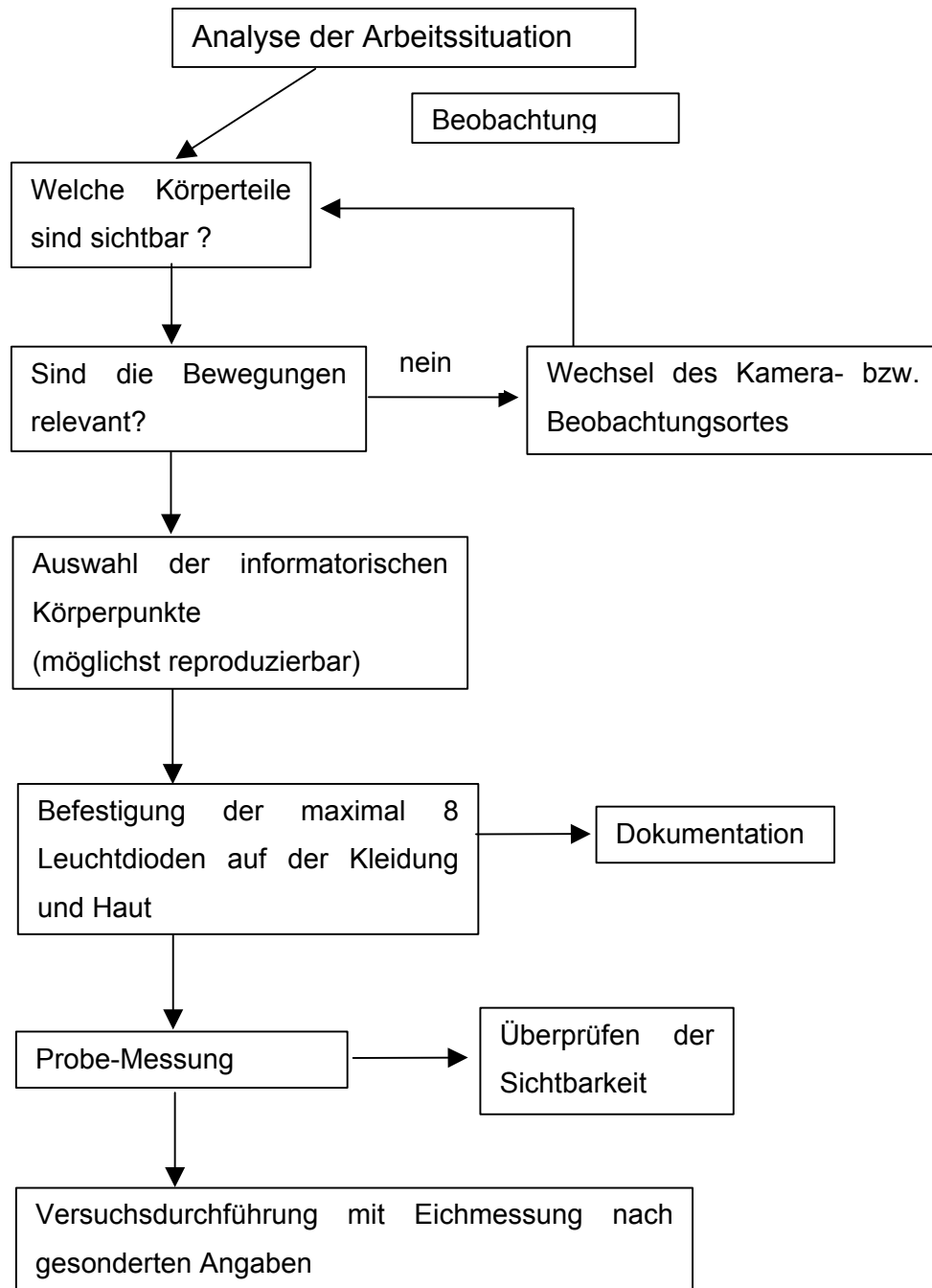
## 9.2 Menustruktur der Analysesoftware

Hauptmenu	Untermenu	
File	New file	
	Save data as	
	Add average channel	
	Straight approximation	
	Copy	
	Area selection	
	Save picture	
	Exit	
Actions	Show object	
	Start motion (restricted length)	
	Continue motion	
	Change speed	
	Step forward	
	Step backward	
	Full motion track	
	All channels	
	Distances from the working surface	
	Coloring method	Velocity based
		Actuality based
		Channel based
	Set reference velocity	
	Delete false points	
	Initialisation	
	Clean screen	

<b>Current point</b>	Move CP in the beginning	
<b>Projections</b>	Front From top From right side	
<b>Long motions</b>	Find long motion	
	Find all long motions	By direction By speed By direction (lim) By speed (lim)
	List of long motions Step of length/time histogram Length/time histogram Summit points	
<b>Working area</b>	Time distribution Graphical	
	Compactness	Step choice Channel choice Estimation
<b>Lines</b>	Define channels Show from the beginning Continue show Show with recording Distances	
	Max distance	Channel x – channel x
	Min distance	Channel x – channel x

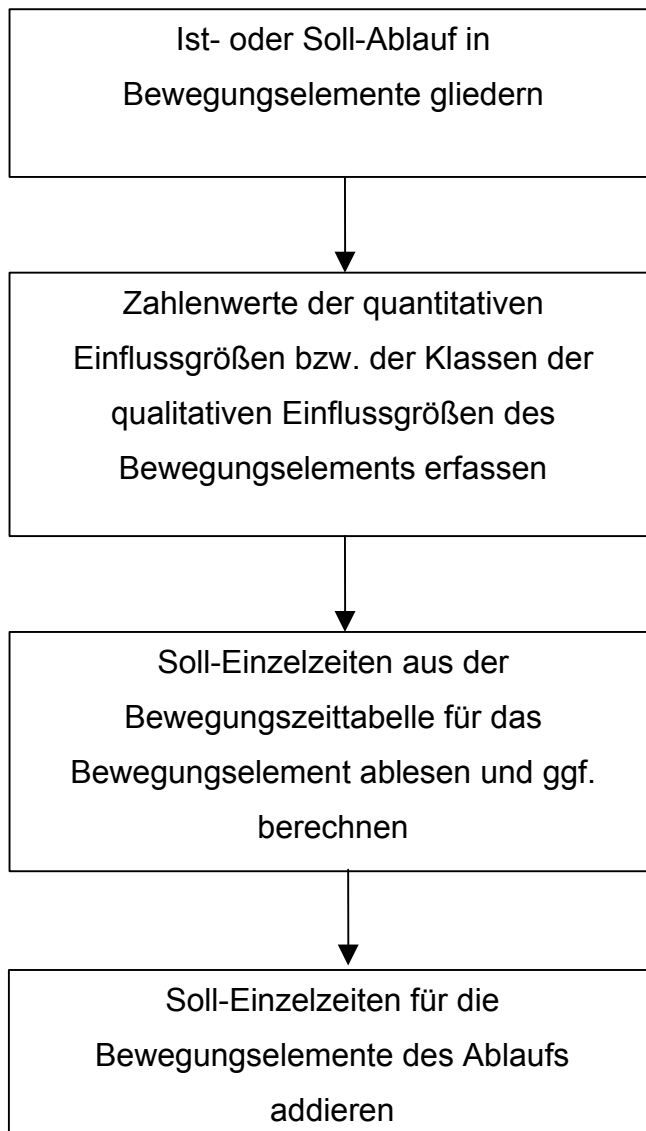
	Don't show the line	
Angles	Step choice for histogram	
	Define channels	
	Angles for 3 connected points, measured	
	Angles for 3 connected points, calculated	
	Define channels	
	Specify distances	
	Angles between two segments	
	Define channels	
		Vertical angles
Zoom	Zoom +	
	Zoom-	
Info	Data description	
	Estimated distances	
	Measured distances	
	Distribution of distances	
	Length/time sequence	

### 9.3 Vorgehensweise für die Durchführung der Bewegungsanalyse an ortsfesten Arbeitsplätzen





## 9.4 REFA-Standardprogramm Systeme vorbestimmter Zeiten



## Erklärung

**Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation von mir selbst verfasst wurde. Dabei habe ich keine anderen, als die angegebenen Hilfsmittel verwendet. Ich bestätige, dass die vorliegende Arbeit noch in keinem anderen Studiengang oder Fachbereich als Prüfungsleistung eingereicht wurde.**

Potsdam-Bornim, den 3. Juni 2004 \_\_\_\_\_